

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY  
KATEDRA TELEKOMUNIKAČNÍ TECHNIKY

**Modulační formát a linkový kód pro komunikaci  
viditelným světlem**

**Modulation Format and Link Code for Visible Light  
Communication**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Stratil**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Modulační formát a linkový kód pro komunikaci viditelným světlem**  
**Modulation Format and Link Code for Visible Light Communication**

## Zásady pro vypracování:

1. Podrobně nastudujte současný stav komunikace viditelným světlem. Zaměřte se na modulační techniky a linkové kódování. Zároveň prostudujte již zavedené standardy definující VLC.
2. Prostudujte a popište modulační formáty a linkové kódy vhodné pro komunikaci viditelným světlem.
3. Sestavte přehled vhodných modulačních formátů a linkových kódů pro VLC.
4. Na základě tohoto přehledu vyberte vhodnou modulační techniku a linkový kód a sestavte vhodný modulátor, který bude řídit výkonovou LED diodu pro VLC.
5. Otestujte komunikační parametry.

## Seznam doporučené odborné literatury:

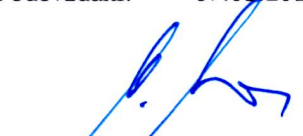
- [1] ARNON, S., J. BARRY a G. KARAGIANNIDIS. *Advanced Optical Wireless Communication Systems*. Cambridge: Cambridge Press, 2012. ISBN 9780521197878.
- [2] BASS, M, C. DECUSATIS, J. ENOCH, V. LAKSHMINARAYANAN, G. LI, C. MACDONALD, V. MAHAJAN a E. VAN STRYLAND. *Handbook of Optics, Third Edition Volume V: Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optics*. New York: McGraw-Hill Professional, 2009. ISBN 978-0071633130.

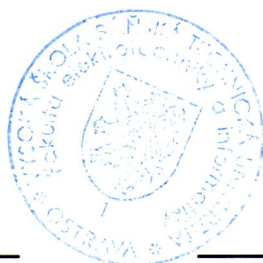
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Vitásek**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 *Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava*.

V Ostravě 1. května 2015

  
.....

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 1. května 2015

  
.....

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu práce za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval těm, kteří mi s prací pomohli, protože bez nich by tato práce nevznikla.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou komunikace viditelným světlem (VLC), konkrétněji modulačními technikami. V teorii popisují principy, problémy a dosažené výsledky výzkumů v oblasti VLC. Také zde popisují modulační techniky, jejich parametry, srovnání a možnosti vyhodnocování. V práci je popsáno originální řešení optického vysílače pro komunikaci viditelným světlem. Pro tento optický vysílač je navržen a popsán řídicí systém pro modulování. Pomocí navrženého řídicího systému jsou následně změřeny komunikační parametry optického vysílače.

**Klíčová slova:** VLC, komunikace viditelným světlem, LED, modulace, vnitřní optické bezvláknové sítě, optický vysílač, osvětlení.

## **Abstract**

This thesis describes visible light communication (VLC), specifically modulation techniques. Describes the principles, problems and achievements in the field of research VLC. Herein describe modulation techniques, their parameters, and comparison options evaluation also. Thesis describe the original solution of the optical transmitter for communicating with visible light. For this optical transmitter is designed and describe a control system for modulating. By using this control system are measure communication parameters of the optical transmitter.

**Keywords:** VLC, Visible Light Communication, LED, modulation, optical transmitter, indoor optical fiberless networks, illumination.

## Seznam použitých zkratek a symbolů

4B6B	– 4 bits /6 bits
AC	– Alternating current
AM	– Amplitude odulation
AMP	– Amplifier
APD	– Avalanche photodiode
BPSK	– Binary PSK
CDR	– Control data recovery
CNR	– Carrier to noise ratio
CSK	– Color shift keying
DC	– Direct current
DD	– Direct detection
DH-PIM	– Double-pulse interval modulation
DMT	– Discrete multitone modulation
DPIM	– Digital pulse interval modulation
DPPM	– Differential pulse-position modulation
EVM	– Error vector magnitude
FER	– Frame error rate
FIR	– fast IR
FM	– Frequency modulation
FSK	– Frequency shift modulation
FSO	– Free-space optic
GaN	– Gallium Nitride
IEEE	– Intitute of Electrical and Electronics Engineers
IM	– Intensity modulated
IM/DD	– Intensity modulated direct detection
IR	– Infrared
IrDa	– Infrared data Association
ISO	– International Organization for Standardization
LC	– obvod cívka - kondenzátor
LD	– Laser diode
LED	– Light emmiting diode
LOS	– Line of sight
MAC	– Media access control

MDPIM	–	Multipple digital pulse-position modulation
MER	–	Modulation error rate
mil	–	měrná jednotka, tisícina palce (0,0254 mm)
NI	–	National Instruments
non-LOS	–	non-line of sight
NRZ-OOK	–	No return zero - on off keying
OFDM	–	Orthogonal frequency-division multiplexing
OOK	–	On off keying
OWC	–	Optical wireless communication
PAM	–	Pulse amplitude modulation
PER	–	Packet error rate
PHY	–	Physical
PI	–	Power-current
PIN	–	Positive-intrinsic-negativ
PPM	–	Pulse position modulation
PSK	–	Phase shift keing
PWM	–	Pulse width modulation
QAM	–	Quadrature amplitude modulation
QPSK	–	Quadrature phase shift keying
RDH-PIM	–	reverse double-pulse interval modulation
RGB	–	Red Blue Green
SER	–	Symbol error rate
SIR	–	Signal to interference
U-OFDM	–	Unipolar OFDM
VFIR	–	Very fast IR
VLC	–	Visible Light Communication
VPPM	–	Variable pulse position modulation
WDM	–	Wavelength-division multiplexing

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Komunikace viditelným světlem VLC</b>	<b>7</b>
2.1	Historie VLC . . . . .	7
2.2	Popis systému . . . . .	7
2.3	Srovnání VLC s IrDA . . . . .	10
2.4	VLC vysílač . . . . .	10
2.5	Charakteristika LED diod . . . . .	11
2.6	Řídící okruh LED diody . . . . .	12
2.7	VLC přijímač . . . . .	13
2.8	Současný stav VLC . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Modulace</b>	<b>15</b>
3.1	Parametry modulací, vyhodnocení modulací a degradační vlivy . . . . .	15
3.1.1	Šířka pásma . . . . .	15
3.1.2	Modulační rychlost . . . . .	15
3.1.3	Přenosová rychlost . . . . .	15
3.1.4	Poměr signál/šum . . . . .	16
3.1.5	Vektorový diagram . . . . .	16
3.1.6	Konstelační diagram . . . . .	16
3.1.7	Bitová chybovost BER . . . . .	16
3.1.8	Modulační chybovost MER . . . . .	16
3.1.9	Amplituda chybového vektoru EVM . . . . .	17
3.2	Intenzitní modulace . . . . .	17
3.3	Analogové modulace . . . . .	18
3.4	Pulzní modulace . . . . .	18
3.4.1	PAM modulace . . . . .	18
3.4.2	On-Off keying modulace OOK . . . . .	19
3.4.3	Pulzní polohová modulace PPM . . . . .	19
3.4.4	Digitální pulzní intervalová modulace DPIM . . . . .	20
3.4.5	Dvojitá pulzní intervalová modulace DH-PIM . . . . .	20
3.4.6	Mnohonásobná digitální pulzní intervalová modulace MDPIM . . . . .	21
3.4.7	Porovnání potřebné šířky pásma . . . . .	22
3.4.8	Porovnání průměrného vysílacího výkonu . . . . .	23
3.4.9	Porovnání vysílací kapacity . . . . .	24
3.5	Digitální modulace . . . . .	26
3.5.1	ASK modulace . . . . .	28
3.5.2	FSK modulace . . . . .	28
3.5.3	PSK modulace . . . . .	29
3.5.4	QAM modulace . . . . .	30



## OBSAH

---

<b>4</b>	<b>Standart 802.11.7</b>	<b>32</b>
4.1	Linkové kódy . . . . .	32
4.2	CSK modulace . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Základní koncept vysílače</b>	<b>34</b>
5.1	LED dioda LXHL-LW6C . . . . .	35
5.2	LED dioda LL-HP60MPGE . . . . .	35
5.3	Optický filtr NT67-119 . . . . .	35
5.4	Polopropustné zrcadlo NT49-754 . . . . .	35
5.5	Odrazné zrcadlo NT63-167 . . . . .	35
5.6	Difuzor . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Měření frekvenční odezvy komunikační LED diody</b>	<b>37</b>
6.1	Bias-Tee . . . . .	38
<b>7</b>	<b>Měření Modulací</b>	<b>40</b>
7.1	Měření PSK modulace na kompletním systému . . . . .	41
7.2	Měření PSK modulace na komunikační LED diodě . . . . .	45
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Literatura</b>	<b>51</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>53</b>
<b>A</b>	<b>Grafy a měření</b>	<b>54</b>

### Seznam tabulek

2.1	Porovnání bezdrátových optických komunikací pro krátkou vzdálenost.[2]	10
3.1	Mapování OOK kódu do 8-PPM, 8-DPIM, 8-DH-PIM a 8-MDPIM symbolů [19]	22
4.1	Fyzický vrstva PHY I [1]	32
4.2	Linkový kód Manchester [1]	32
4.3	Souřadnice barev pro jednotlivá data [1]	33
A.1	Rychlosti modulací PSK na kompletním optickém vysílači	54
A.2	Naměřené hodnoty MER a EVM pro PSK modulace na kompletním optickém vysílači	59
A.3	Rychlosti modulací PSK na komunikační LED diodě	60
A.4	Naměřené hodnoty MER a EVM pro PSK modulace na komunikační LED diodě	65

**Seznam obrázků**

2.1	Blokové schéma rozdělení přenosového řetězce VLC systému [2] . . . . .	8
2.2	Geometrie pro vnitřní, nesměrovou LOS topologii [2] . . . . .	9
2.3	Diagram vztahu mezi proudovou hustotou a šířku pásma pro úroveň 3 dB [4] . . . . .	12
2.4	PI charakteristika LED diody a znázornění principu modulace . . . . .	13
3.1	Grafické znázornění chybového vektoru [15] . . . . .	17
3.2	Analogová frekvenční modulace s intenzitní modulací [10] . . . . .	18
3.3	Pulzní amplitudová modulace [10] . . . . .	19
3.4	Pulzní polohová modulace [10] . . . . .	19
3.5	Strom rozdělení pulzních modulací [19] . . . . .	20
3.6	Struktura symbolu pro OOK, PPM, DPIM, DH-PIM a RDH-PIM, pro $M = 4$ [18] . . . . .	21
3.7	Porovnání potřebné šířky pásma pro modulace PPM, DPIM, DHPIM1, DHPIM2, MDPIM a DPPM . . . . .	23
3.8	Porovnání průměrného výkonu pro modulace PPM, DPPM, DPIM, DH-PIM pro $\alpha = 1$ a RDH-PIM . . . . .	25
3.9	Porovnání přenosové kapacity modulací PPM, DH-PIM ( $\alpha = 1$ ), DH-PIM ( $\alpha = 2$ ), DPPM a DPIM . . . . .	27
3.10	Vektorový diagram modulace BASK (2ASK) a QASK (4ASK) . . . . .	28
3.11	Vektorový diagram modulace BPSK(2PSK) a QPSK(4PSK) . . . . .	30
3.12	Vektorový diagram modulace 16QAM . . . . .	31
4.1	Souřadnice barev [1] . . . . .	33
5.1	Koncept vysílače[20] . . . . .	34
6.1	Schéma měření frekvenční odezvy LED diody . . . . .	37
6.2	Změřená frekvenční odezva komunikační LED diody . . . . .	38
6.3	Změřená frekvenční odezva obvodu zx85-12g-s+ . . . . .	39
7.1	Zapojení NI PXI 5670 - vektor signálového generátoru z dvou modulů NI PXI-5610 a NI PXI-5421 [23] . . . . .	40
7.2	Blokové schéma zapojení pro měření modulací . . . . .	41
7.3	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 1 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	42
7.4	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 5 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	43
7.5	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 10 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	43
7.6	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 15 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	44
7.7	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 1 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	45
7.8	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 3 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	46

7.9	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 5 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	47
7.10	Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 7 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	47
A.1	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	55
A.2	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	55
A.3	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 10 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	56
A.4	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 15 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	56
A.5	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	57
A.6	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	57
A.7	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 10 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	58
A.8	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 15 MHz na kompletním optickém vysílači . . . . .	58
A.9	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	61
A.10	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 3 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	61
A.11	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	62
A.12	Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 7 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	62
A.13	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	63
A.14	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 3 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	63
A.15	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	64
A.16	Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 7 MHz na komunikační LED diodě . . . . .	64

### 1 Úvod

V dnešní době se díky pokroku LED technologie začínají více využívat bílá LED světla pro osvětlovací účely, jak v kancelářích, domácnostech, v průmyslových objektech, tak i v automobilovém průmyslu a dále. Kvůli přehlcení pásma rádiové oblasti, jsou cíle výzkumů směřovány právě pro využití této viditelné oblasti světla pro komunikaci. Cílem je pomocí světla, které je určeno pro osvětlování, přenášet informace, nezávisle na změně osvětlovací funkce.

Hlavním cílem této práce je návrh jednoduchého modulátoru pro otestování komunikačních parametrů již zadaného optického vysílače. V teoretické části nejdříve popisují komunikaci pomocí viditelné oblasti světla, konkrétně v kapitole 2. Jsou zde popsány principy a problémy této technologie. Na konci této kapitoly je popsán stručný přehled dosažených výsledků v jednotlivých výzkumech z celého světa. V další kapitole 3 je seznámení s modulacemi, jejich rozdělení, parametry a vyhodnocování. V podkapitole 3.4 jsou podrobně popsány a porovnány pokročilé pulzní modulace pro oblast VLC. V kapitole 4 jsou popsány důležité informace týkající se modulací a linkových kódů, definované standardem 802.11.7.

Mnou proměřovaný optický vysílač je popsán v kapitole 5. Další kapitola 6 je již čistě praktická a popisuje měření frekvenční odezvy LED diody, která je potřebná pro stanovení maximálních komunikačních mezí optického vysílače. V této kapitole je také představen prvek, díky kterému je možné modulovat výkonovou LED diodu. Poslední kapitola 7 popisuje měření komunikačních parametrů optického vysílače a dosažené výsledky.

## 2 Komunikace viditelným světlem VLC

Komunikace ve viditelném spektru přenáší data pomocí intenzitní modulace optického zdroje, jako jsou světlo emitující diody LED a laser diody LD, rychleji, než dokáže oko zaznamenat. Takový způsob komunikace může být použit v oblasti osvětlení, billboardů, pouličního osvětlení, dopravních prostředků a světelné signalizace.[1]

Lidské oko dokáže zaznamenat změny světelného jasu a výkonu, které jsou pomalejší než 200 Hz. Vzhledem k tomu, že LED diody a fotodiody mohou pracovat s mnohem větší frekvencí, můžeme toho využít pro spojení dvou funkcí, a to k osvětlení a komunikaci.[1]

### 2.1 Historie VLC

Komunikace viditelným světlem mají krátkou historii s porovnáním s ostatními komunikačními technologiemi. V roce 1999 v Hong Kongu byl představen systém, který pomocí bílé LED diody přenášel zvukovou stopu. Lze se domnívat, že aktivní výzkum této technologie začal v roce 2005. Systém VLC není ještě schopen být použit v komerčním použití, ale nachází se ve stavu výzkumu.[2]

Pokud se ale podíváme do daleké historie, zjistíme, že komunikace viditelným světlem sahá do hodně daleké historie. Světelné komunikace jsou již mnoho let starou technologií. Tento typ komunikace zahrnuje předávání informace pomocí optického záření vzduchem z jednoho bodu do druhého. Kolem roku 800 př.n.l., antičtí Řekové a Římané využívali ohnivé majáky pro signalizaci a od roku 150 př.n.l., američtí indiáni používali kouřové signály pro stejný účel komunikace. Jiné optické signalizační techniky, jako semafor, byly použity námořními navigátory ve Francii v roce 1790. Ale co může být nazýváno jako první optický komunikační kanál, je experimentální zařízení "photophone" známého vynálezce Alexandra Grahama Bella z roku 1880. V jeho experimentu Bell moduloval sluneční záření s hlasovým signálem a přenášel ho do vzdálenosti okolo 200 m. Přijímač byl vyroben z parabolického zrcadla s destičkou vyrobenou ze selenu v jeho ohnisku. Nicméně, experiment nedopadl nejlépe, protože zařízení bylo moc robustní a problém nastal při nepřítomnosti slunečního záření.[3]

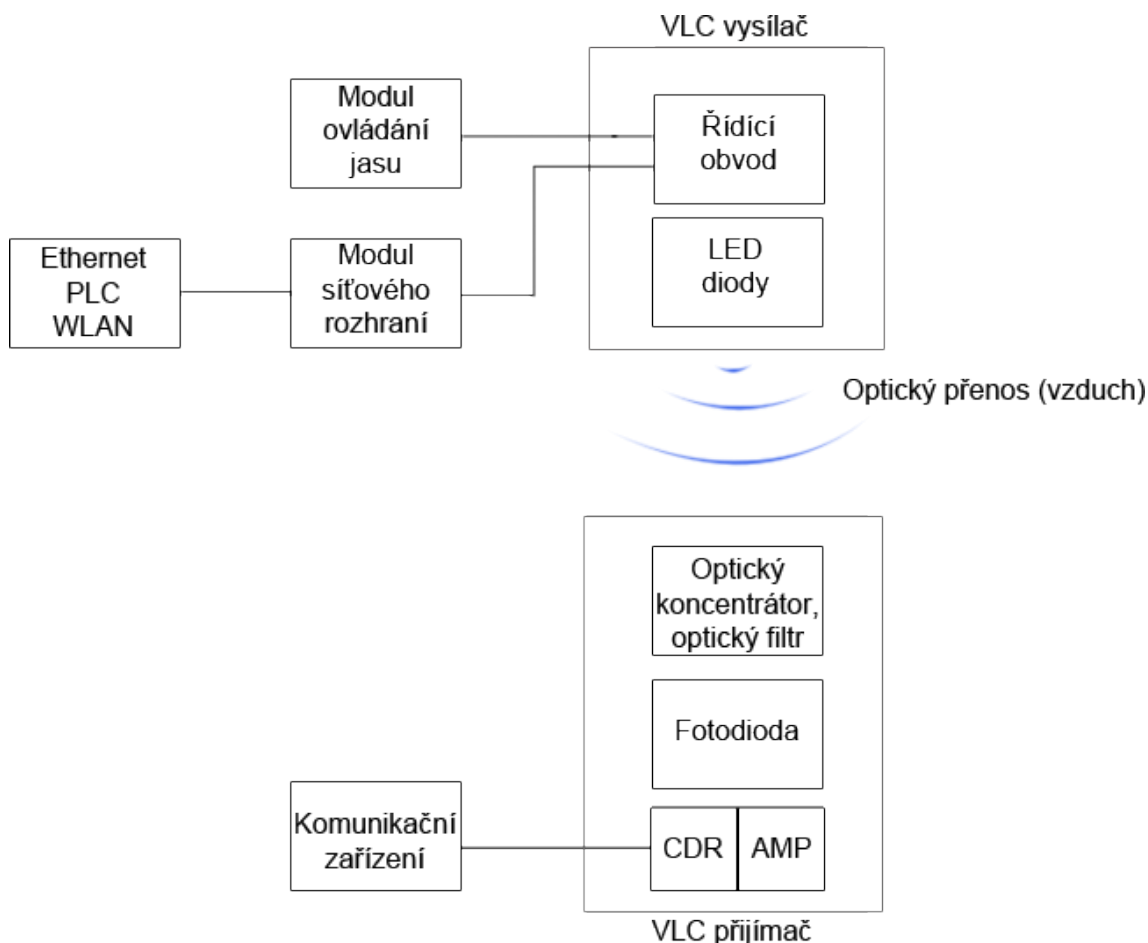
### 2.2 Popis systému

Optická bezdrátová komunikace OWC je obecný termín pro označení bezdrátové komunikace s optickou technologií. Obvykle OWC zahrnuje komunikaci pomocí infračerveného spektra pro krátké vzdálenosti a optické komunikace ve volném prostoru FSO pro komunikaci na větší vzdálenosti.[2]

Komunikace ve viditelném spektru VLC označuje komunikační technologie, které využívají viditelné světlo jako optický nosič pro přenos dat i osvětlení. V dnešní době, LED diody pracující na viditelných vlnových délkách (380 nm - 780 nm), mohou být použity jako zdroj komunikace. Samozřejmě křemíkové fotodiody, které vykazují dobrou citlivost na viditelné oblasti vlnových délek, se používají jako přijímače informací. Přenosový kanál tedy tvoří vzduch, ať ve vnějším prostředí, tak i v uzavřených prostorách. V současné době, se výzkum VLC systému zaměřuje na použití v interiérech. Vnitřní VLC systém je

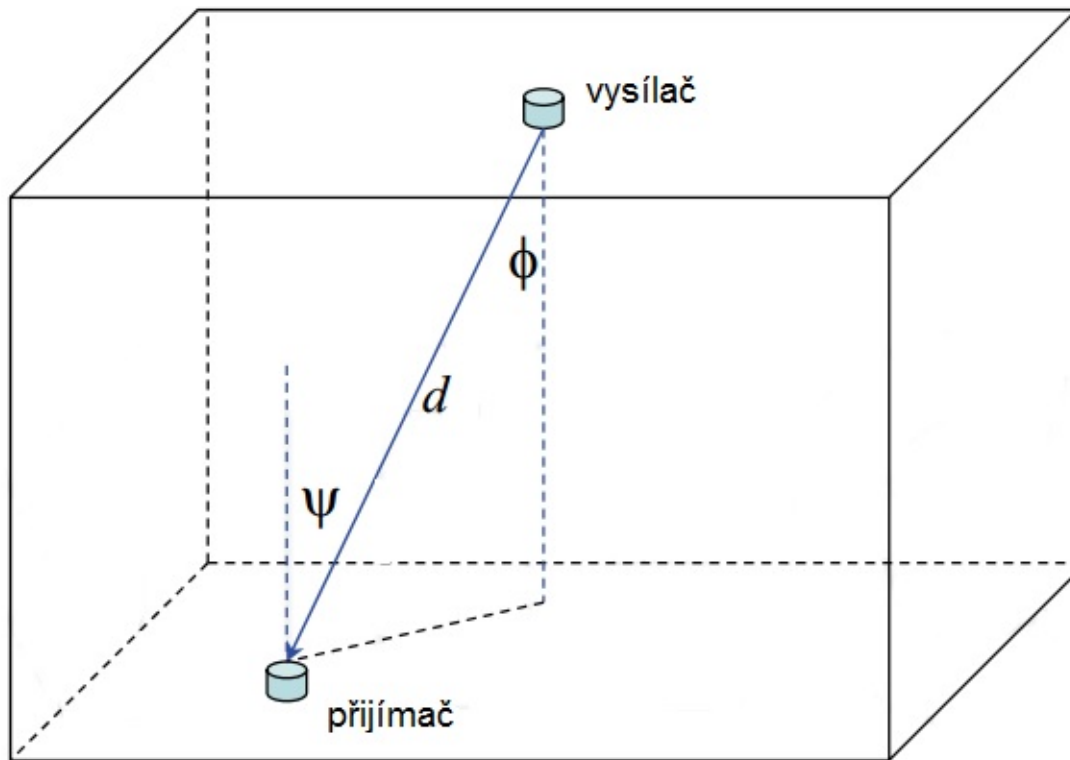
## 2 KOMUNIKACE VIDITELNÝM SVĚTLEM VLC

převzat z běžné IR komunikace, protože linková komunikace systému VLC je podobná IR komunikaci. Rozdíly přichází s rozdílnými vlnovými délkami, se kterými se pracuje. Další rozdíl je v tom, že u VLC je zapotřebí dbát i na fakt, že je potřeba nejen komunikovat, ale i osvětlovat. Ostatní fyzikální principy vztahující se k optice lze použít podobně, včetně přenosu světla a odrazů.[2] Na obrázku 2.1 je znázorněn přenosový řetězec VLC systému.



**Obrázek 2.1:** Blokové schéma rozdělení přenosového řetězce VLC systému [2]

Konfigurace topologie je rozdělena do čtyř základních typů s ohledem na existenci překážek v cestě světla a směrovosti vysílače a přijímače. Mezi základní typy topologie je směrový LOS, nesměrový LOS, směrový non-LOS a nesměrový non-LOS. Rozhodnutí, zda je topologie směrová, nebo nesměrová, závisí na tom, jestli vysílač je přímo směřován na přijímač. Rozhodnutí, jestli je topologie LOS, nebo non-LOS, závisí na přítomnosti překážky, která blokuje průchod světla mezi přijímačem a vysílačem. Ve VLC systémech je nesměrová LOS topologie nejčastější, protože všeobecně osvětlení není nijak úzce směřováno.[2] Na obrázku 2.2 je ukázka nesměrové LOS topologie pro vnitřní VLC systém.



**Obrázek 2.2:** Geometrie pro vnitřní, nesměrovou LOS topologii [2]

Na základě analýzy pro směrovou LOS topologii, je přijatý optický výkon  $P$  v přijímači vyjádřen pomocí vzorce 2.1 . [2]

$$P = P_t \cdot \frac{(m+1)}{2\pi d^2} \cdot \cos^m(\phi) \cdot T_s(\psi) \cdot g(\psi) \cdot \cos(\psi), 0 \preceq \psi \preceq \Psi_c, \quad (2.1)$$

Kde  $P_t$  je vysílaný výkon z LED,  $\phi$  je úhel záření z vysílače k přijímači s ohledem na osu kolmou k povrchu vysílače,  $\psi$  je úhel dopadu, vzhledem k osy kolmé k povrchu přijímače,  $d$  je vzdálenost mezi LED a detektorem.  $T_s(\psi)$  je přenos filtru.  $g(\psi)$  je zisk koncentrátoru.  $\Psi_c$  je zorné pole FOV koncentrátoru, což je polo úhel na polovinu výkonu.  $m$  je řád Lamberského svazku, který je dán vysílaným polo úhlem (při polovičním výkonu)  $\Phi_{1/2}$  jako vzorec 2.2. [2]

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\Phi_{1/2})} \quad (2.2)$$

Zde,  $m = 1$  v případě, že  $\Phi_{1/2} = 60^\circ C$  (Lamberský svazek). Z osové symetrie jak je na obrázku 2.2 patrné, můžeme říct, že  $\psi = \phi$ . Koncentrátor a optický filtr může být použit před fotodetektozem.[2]



## 2 KOMUNIKACE VIDITELNÝM SVĚTLEM VLC

### 2.3 Srovnání VLC s IrDA

Pro jasnou představu systému VLC, je potřeba porovnat s infračerveným komunikačním systémem IrDA. Rozdíly mezi VLC a IrDA systémy jsou v tabulce 2.1.

**Tabulka 2.1:** Porovnání bezdrátových optických komunikací pro krátkou vzdálenost.[2]

	VLC	IrDA
<b>Přenos dat</b>	>100Mb/s (podle LED)	4 Mb/s (FIR) 16 Mb/s (VFIR)
<b>Status</b>	Ve výzkumu a standardizováno v IEEE	Standardizováno (IrDA)
<b>Dosah</b>	metry	3 metry
<b>Regulace</b>	Ne	Ne
<b>Bezpečnost</b>	Dobrá	Dobrá
<b>Nosná vlnová délka</b>	380 - 780 nm viditelné spektrum (více vlnový délek)	850 nm infračervená
<b>Služby</b>	Komunikace, osvětlení	Komunikace
<b>Zdroje rušení</b>	Sluneční světlo, Jiné zdroje světla	Okolní osvětlení
<b>Působení na okolí</b>	Denní používání, bezpečné pro zrak (viditelné)	Bezpečné pro zrak pro malé výkony (neviditelné)
<b>Použití</b>	Vnitřní komunikace a komunikace mezi vozidly,	Dálkové ovládání, Bod-bod spojení

Infračervená komunikace je standardizovaná jako IrDA a stále se vyvíjí. Rychlost přenosu dat pro infračervenou komunikaci dosahuje 4 Mb/s (FIR) a 16 Mb/s (VFIR). Na druhou stranu, rychlost přenosu dat u VLC systému je závislá na šířce pásma LED. [2].

### 2.4 VLC vysílač

Mezi hlavní složky VLC vysílače patří LED dioda, která emituje bílé světlo. VLC vysílač je odlišný od běžných konvenčních komunikačních vysílačů tím, že u VLC vysílače se musí jednat o komunikační vysílač a zdroj osvětlení současně. Tyto dva požadavky se musí vzít v úvahu. Pro vysílač se obvykle používají LED diody pracující ve viditelném spektru, jako modulační zařízení. Pro datovou modulaci LED diody je zapotřebí využívat šířky pásma modulační LED diod pracující ve viditelné oblasti. LED diody pro osvětlovací účely jsou obvykle vysoce jasové LED diody a výrobci nebudou vyvíjet vysoce jasové LED diody pro komunikační aplikace. Většina výkonových LED diod pro osvětlení mají šířku pásma v jednotkách MHz, až deset MHz. Díky tomu je rychlost přenosu pomocí LED diod omezena na několik desítek MHz. [2]

Byl proveden výzkum na zvýšení šířky pásma modulační uspořádaných bílých LED diod pomocí více stavové modulační pro VLC systém. Experiment ověřil systém VLC

s šestnácti LED diodami, kde dosáhli šířky pásma 25 MHz a přenosové rychlosti 40 Mbit/s.[2]

Vysílač musí sloužit také jako zdroj osvětlení. Podmínkou je, že osvětlení pro vnitřní kancelářské prostory musí být 200 - 1000 lx (lux), podle normy ISO (2003). Vysoko jasné LED diody pracují s propustnými proudy většími jak sto miliampér. Takovýto proud je poměrně velký, se srovnáním s běžnými komunikačními zařízeními. Proto, modulovat data na vysoko jasné LED diodě při zachování úrovně osvětlení, je konstrukčně mnohem složitější, než běžné konstrukce komunikačních vysílačů.[2]

### 2.5 Charakteristika LED diod

LED diody pracující ve viditelné oblasti lze rozdělit do dvou kategorií vlnových délek. První kategorie jsou jednobarevné LED diody, například červené (R), zelené (G), nebo modré (B). Druhá kategorie jsou bílé LED diody, které využívají luminofory pro konverzi emisní vlnové délky z původní aktivní oblasti. Typicky, červené, zelené a modré LED diody vyzařují oblast spektra, v závislosti na materiálu čipu. Červené LED diody vyzařují světlo v oblasti vlnových délek 625 nm, zelené kolem 525 nm a modré LED diody kolem 470 nm.[2]

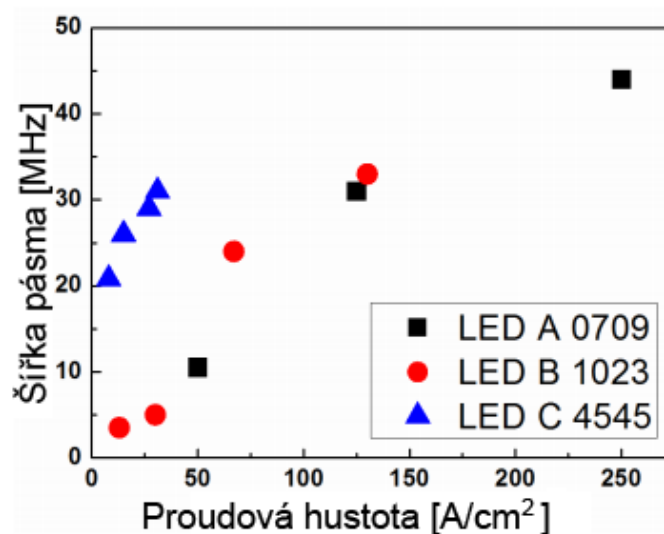
PI charakteristika je jedna z nejdůležitějších vlastností LED diody. Lineární závislost výstupního optického výkonu na vstupním proudu úzce souvisí s výkonem modulace dat a usnadňuje provoz modulací na LED diodě. Výstup optického výkonu závisí na okolní teplotě. Teplotní závislost výstupního optického výkonu se mění s použitým materiálem čipu LED diody. Obecně platí, že s rostoucí teplotou výstupní optický výkon klesá.[2]

Na druhou stranu, jako zdroj osvětlení se na bílé LED diody zaměřuje hodně pozornosti. Srovnáme-li LED osvětlení s konvenčním osvětlením, jako je fluorescenční svítidla a žárovky, LED osvětlení má mnoho výhod, jako je vysoká účinnost, šetrnost k životnímu prostředí při výrobě, flexibilita návrhu vzhledu osvětlení, dlouhá životnost a lepší využití spektra.[2]

Většina bílých LED diod se skládá z LED čipu emitující krátkou vlnovou délku a převodníku vlnové délky (například fosfor). Světlo o krátké vlnové délce je emitováno z LED čipu. Toto emitované světlo je absorbováno fosforem a následně fosfor emituje světlo o delších vlnových délkách. Výsledkem je světlo o více vlnových délkách. Bílé světlo je obvykle vytvořeno pomocí modrého LED čipu s příslušným fosforem. Emisní spektrum LED diody na bázi fosforu obsahuje silnou část modrého spektra a další vlnové délky, které jsou posunuty díky fosforu.[2]

Z hlediska osvětlení, RGB diody nebo bílé LED diody mohou být použity pro VLC. Nicméně, je potřeba také dbát na dobu odezvy každé LED diody z komunikačního hlediska, protože rychlost přenosu dat pomocí LED diody je přímo závislá na době odezvy LED diody. V podstatě, bílé LED diody založené na bázi fosforu mají delší náběžnou a sestupnou dobu, kvůli absorpci a emisi fosforu.[2]

V [4] ověřili pomocí praktického měření, že proudová hustota na čipu LED ovlivňuje frekvenční odezvu LED diody. Čím větší proudová hustota, tím větší šířky pásma LED dioda dosahuje. V článku testovali tři velikosti čipu, kdy nejmenší z nich dosáhl největší proudové hustoty a díky tomu i největší šířky pásma. Na obrázku 2.3 je znázorněn vztah



Obrázek 2.3: Diagram vztahu mezi proudovou hustotou a šířkou pásma pro úroveň 3 dB [4]

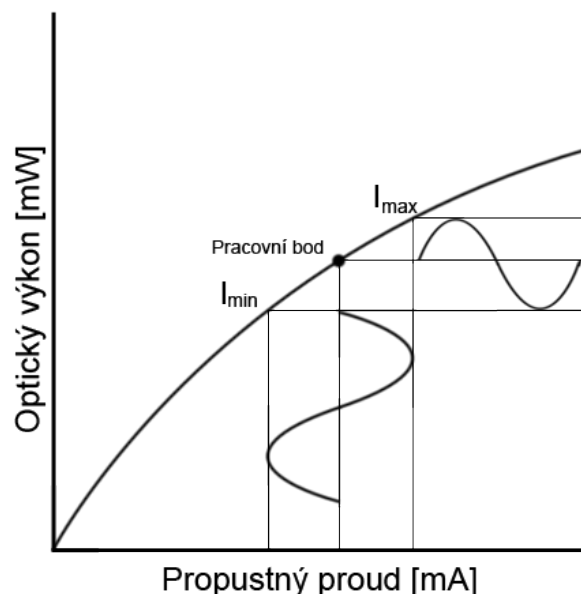
mezi proudovou hustotou a šířkou pásma. LED A 0709 má nejmenší velikost čipu a to  $07 \times 09$  mil. LED B má velikost čipu  $10 \times 23$  mil a LED C  $45 \times 45$  mil.

### 2.6 Řídící okruh LED diody

Pro využití LED diody jako zdroj komunikace a jako osvětlení současně, je nutné spojit datový signál přes signál řídicí stmívání. Modulace se přivádí na LED společně s odpovídajícím stejnosměrným proudem nastavující pracovní bod. Pro modulaci LED nebo LD přímo, se musí přes tranzistor zapínat celé napájecí napětí LED diody. Na obrázku 2.4 je znázorněna PI charakteristika a princip modulování okolo pracovního bodu, který se nastaví pracovním proudem.[2]

Vzhledem k tomu, že vysílač obsahuje stejnosměrný proud pro osvětlení a řídicí proud pro modulaci, může být použit "Bias Tee" pro míchání stejnosměrné složky a střídavé složky nesoucí data. Tím se jednoduše nastaví pracovní bod LED diody. Chceme-li navrhnout vhodný řídicí systém pro VLC, musíme brát v úvahu tyto položky:[2]

- Potřebný propustný proud LED diody: hloubka modulačního signálu a pracovní proud
- Náběžný a sestupný čas LED diody: maximální přenosová rychlost
- Kompatibilita osvětlení s komunikací
- Princip návrhu: Použit polovodičový řídicí obvod nebo ne
- Ztráty výkonu a tepelná konstrukce vysílače



Obrázek 2.4: PI charakteristika LED diody a znázornění principu modulace

### 2.7 VLC přijímač

VLC přijímač se skládá z přijímacích optických prvků, jako například optický koncentrátor, optický filtr, fotodiody, zesilovač a obvod pro obnovení signálu. Jednoduše řečeno, systém VLC je navržen pro přímou detekci na fotodetektoru. Optický koncentrátor se používá pro kompenzaci vysokých prostorových útlumů, kvůli rozložení optického výkonu do prostor pro funkci osvětlení větší plochy. Použitím vhodného koncentrátoru, může být zvýšena efektivní oblast pro sběr optického záření. Systém VLC je citlivý na sluneční světlo a další zdroje záření, proto je důležité použít vhodný optický filtr, který odstraní nežádoucí složky. Tím oddělí nežádoucí složky světla od datového signálu.[2]

Fotodiody s dobrou citlivostí pro viditelné světlo jsou fotodiody křemíkové PIN a křemíkové lavinové fotodiody APD. Fotodiody s silikonovým materiálem pracují v oblasti od 400 nm až do 1200 nm, který zahrnuje i oblast viditelného spektra. Existuje mnoho fotodiód, jejichž šířka pásma dosahuje více než 200 MHz, což je mnohem větší šířka pásma než pro vysílače s LED diodami.[2]

Existuje několik typů obvodů pro zesílení signálu. Zesilovač s velkou impedancí je snadno realizovatelný. Odpor je připojen do série k anodě fotodiody a zesilovač s vysokou vstupní impedancí snímá napětí přes sériový odpor a zesílí ho. Trans-impedanční zesilovač převádí proud na napětí pomocí směšovacího zpětnovazebního odporu na invertujícím vstupu zesilovače.[2]

Obecně platí, že šum v VLC přijímači, je podobný jako šumu v běžných optických přijímačích pro optické komunikace. Například tepelný šum ze zatěžovacího odporu a

fotodiody, výstřelkový šum ve fotodiodě, přebytečný šum ze zesilovače. Hlavní složkou šumu jsou sluneční záření a další zdroje světla.[2]

### 2.8 Současný stav VLC

O výzkum v oblasti VLC se zajímá mnoho institutů v Asii, Evropě a U.S. Využívá se LED postavené na GaN, jako zdroj signálu. Modulační signál dokáže přenášet data rychleji, než dokáže lidské oko zaznamenat, proto, dvojitá funkce LED dělá systém VLC populární pro výzkum v oblasti bezdrátové optické komunikaci. 15. srpna roku 2009 byl vydán výzkum v "IEEE Photonics Technology Letters"[5], kde použili bílou LED jako vysílač. Tato dioda dosahovala šířky pásma jen pár megahertz, což všeobecně omezuje datový přenos pro jakýkoliv komunikační systém. V tomto výzkumu na detektoru snímali pouze modrou složku světla a využili jednoduchý analogový ekvalizér prvního řádu. Pomocí NRZ-OOK modulace dosáhli přenosových rychlostí 100 Mb/s. V roce 2010, 25. října, byl publikován výzkum v Journal of Lightwave Technology [6]. V tomto výzkumu dosáhli přenosové rychlosti 513 Mbit/s na bílé LED, díky použití DMT modulace s QAM modulací. Šestého až desátého Března 2011 proběhla konference v Los Angeles, která se jmenovala Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference [7], kde aplikovali WDM a DMT modulace na RGB LED, díky čemuž dosáhli přenosové rychlosti 803 Mbit/s. Desátého října roku 2014 vyšel odborný článek v Chinese Optics Letters, kde díky pre-ekvalizéru a NRZ-OOK modulace dosáhli modulační rychlosti 200 Mbit/s na bílé LED. Více v [8]. Chvilí po tom, 27. října 2014, byl publikován odborný článek v OPTICS EXPRESS, kde využili pre-ekvalizaci postavenou na třech tranzistorech a po-ekvalizaci na detekční straně. Po využití jednoduché NRZ-OOK modulace, dosáhli pomocí bílé LED přenosové rychlosti 550 Mbit/s. V článku se podrobně zabývají ekvalizací na vysílací i detekční straně. Více v [9].

### 3 Modulace

Modulace je proces, při kterém je ovlivňován určitý parametr nosného signálu v závislosti na okamžité hodnotě modulačního signálu. Nosným signálem může být harmonický signál, se třemi parametry. Amplituda, kmitočet a počáteční fáze. V optických komunikacích se využívá interní a externí modulace. Interní modulace funguje na principu, že zdroj světla je již řízen modulovaným elektrickým signálem. U externí modulace je modulován až výstupní optický signál. Externí typ modulace má velkou výhodu v tom, že šetří optický zdroj světla a obchází omezení v rychlosti modulování interní modulací. V této práci se budu zabývat jen interním modulacím.[10, 11]

#### 3.1 Parametry modulací, vyhodnocení modulací a degradační vlivy

Jelikož budu dále v této kapitole popisovat jednotlivé modulace a jejich rozdělení, je potřeba si nejdříve říci o určitých vlastnostech modulací a jejich způsobu vyhodnocování.

##### 3.1.1 Šířka pásma

Šířka pásma je nejdůležitější parametr v digitálních modulacích. Většinou je značena písmenem  $B$  a je rozdělena na dva druhy modulací.[12]

První je absolutní šířka pásma, která je udána rozsahem kmitočtů, ve kterém má signál nenulovou spektrální hustotu. V praxi je tato metoda určení šířky pásma nevhodná a nepoužívá se, protože často mají modulované signály neomezené frekvenční pásmo a zabírají tak v kmitočtovém spektru od nuly do nekonečna.[12]

Nejčastěji se tedy používá šířka pásma pro danou úroveň a to konkrétně pro 3 dB. Tato šířka pásma vyčleňuje rozsah ohraničený kmitočty, na kterých klesne spektrální výkonová hustota na polovinu, tedy o 3 dB, vůči své maximální úrovni. Další často užívaná šířka pásma je pro úroveň 20 dB. [12]

##### 3.1.2 Modulační rychlost

Také jako symbolová rychlost je počet přenesených symbolů za jednu sekundu. Nebo převrácená hodnota doby trvání jednoho signálového prvku. Vzorec 3.1 pro vyjádření modulační rychlosti. Jednotkou je baud (Bd). [12, 13]

$$M = \frac{1}{T_{SP}} \quad (3.1)$$

##### 3.1.3 Přenosová rychlost

Udává počet bitů přenesených za jednu sekundu. Přenosová rychlost  $R$  se také nazývá bitová frekvence  $f_b$ . Ve vzorci 3.2 je  $Q$  počet možných stavů signálu.  $\log_2 Q$  je počet bitů odpovídajících jednomu přenesenému signálovému prvku. Jednotkou je bit/s. [12]

$$R = f_b = M \cdot \log_2 Q \quad (3.2)$$

## 3 MODULACE

---

### 3.1.4 Poměr signál/šum

Pro signály v základním pásmu se označuje poměr signál-šum SNR. Pro modulované signály je tento poměr označován CNR. Tyto označení se však často zaměňují. Jiným poměrem je vztah signál-interference SIR, kde interferencemi jsou součty šumů intermodulačních a harmonických zkreslení.[12]

### 3.1.5 Vektorový diagram

Zobrazuje jednotlivé stavy a přechody mezi nimi v IQ rovině. Na vektorovém diagramu jsou vidět cesty, kterými prochází nosná vlna při přechodu z jednoho stavu do druhého, nejsou však explicitně vidět chyby v jednotlivých stavových polohách. Příklady vektorového diagramu jsou vidět na obrázku 3.10 a 3.11. [14]

### 3.1.6 Konstelační diagram

Je podobný vektorovému diagramu, zobrazuje však pouze koncový bod fázoru tak jak je opakovaně snímán v okamžicích rozhodnutí, kdy je signál vzorkován. Z tohoto diagramu lze vyhodnotit různé druhy degradace signálu. [14]

### 3.1.7 Bitová chybovost BER

Tato veličina je poměr chybně přenesených bitů za jednotku času a celkového počtu přenesených bitů za jednotku času. Změřená chybovost na konkrétním systému je značena BER 3.3. Podobně je definovaná symbolová chybovost SER 3.4, paketová chybovost a rámcová chybovost FER.[12]

$$BER = \frac{n_{BE}}{n_B} \quad (3.3)$$

$$SER = \frac{n_{SE}}{n_S} \quad (3.4)$$

### 3.1.8 Modulační chybovost MER

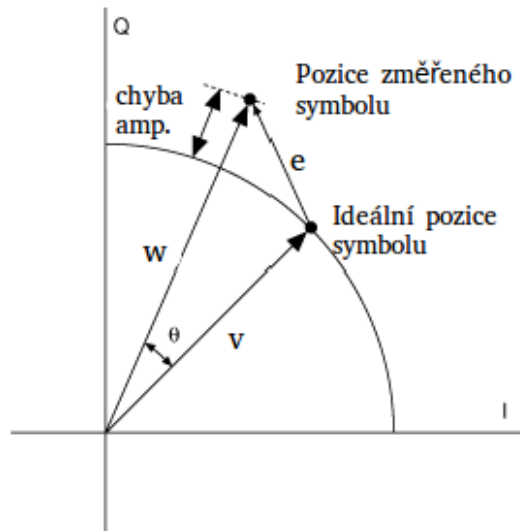
Modulační chybovost MER je poměr signálu od šumu SNR v digitálně modulovaném signálu. Stejně jako SNR se MER obvykle udává v decibelech. MER je definován jako 3.5. kde  $I_j$  je složka I přijatého j-tého symbolu,  $Q_j$  je Q složka j-tého přijatého symbolu,  $\tilde{I}_j$  je ideální složka I přijatého j-tého symbolu a  $\tilde{Q}_j$  je ideální složka Q j-tého přijatého symbolu. [15]

$$MER = \frac{\sum_{j=1}^N (\tilde{I}_j^2 + \tilde{Q}_j^2)}{\sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]} \quad (3.5)$$

### 3 MODULACE

#### 3.1.9 Amplituda chybového vektoru EVM

Amplituda chybového vektoru je měření výkonu modulátoru a demodulátoru v přítomnosti vad. V podstatě, EVM je rozdílový vektor v daném okamžiku mezi ideálním vysílaným signálem a naměřeným přijatým signálem. Pokud měření je provedeno správně, může toto měření pomoci při identifikaci zdrojů degradace signálu, jako například fázový šum, nerovnováha IQ složek, amplitudové nelinearity a zkreslení filtrem. [16, 15]



Obrázek 3.1: Grafické znázornění chybového vektoru [15]

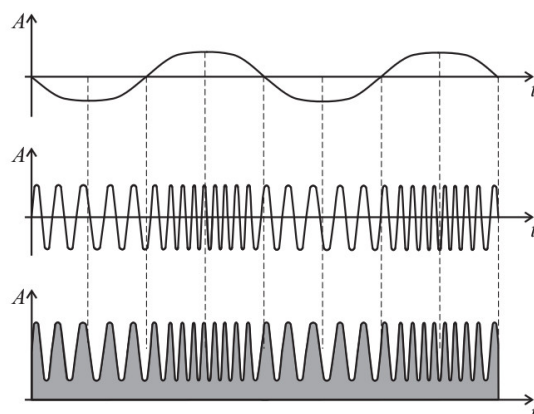
Na obrázku 3.1 je vidět vektor ideálního symbolu  $v$ , vektor  $w$  změřeného symbolu.  $w - v$  je chyba amplitudy a  $\theta$  je fázová chyba. Vektor  $e$  je chybový vektor. Podíl vektoru  $e$  a  $v$  nám dá EVM. EVM je definován vzorcem 3.6. [15]

$$EVM = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [(I_j - \tilde{I}_j)^2 + (Q_j - \tilde{Q}_j)^2]}}{|v_{max}|} \quad (3.6)$$

#### 3.2 Intenzitní modulace

Velmi oblíbená modulace pro optické komunikace je intenzitní modulace IM, ve které je modulován okamžitý optický výkon. Tato modulace není přímo speciální typ modulace, ale je to způsob vysílání informace pomocí optického výkonu. Řídící obvod vysílače na základě přijaté vstupní informace, řídí optický výkon vysílače. Tento optický výkon je zachycen na přijímací straně pomocí detektoru a převeden pomocí přímé detekce DD na elektrický signál. Na okamžitém přijatém optickém výkonu je závislá velikost výstupního elektrického signálu. Tato technika vysílání a přijímání se nazývá IM/DD. [10]





Obrázek 3.2: Analogová frekvenční modulace s intenzitní modulací [10]

### 3.3 Analogové modulace

Analogová modulace je historicky nejstarší. Využívají se dva druhy analogové modulace, a to amplitudová modulace AM a frekvenční modulace FM. AM je zatížena aditivním šumem více, než FM, proto je FM upřednostňována. Další výhody FM oproti AM je lepší odolávání okolnímu nechtěnému záření díky frekvenčnímu posunu. Další výhodou je, že díky různým frekvencím nosných vln, můžeme vytvořit vícenásobný přístup uživatelů k médiu.[10]

### 3.4 Pulzní modulace

Velmi často využívané modulace v optických komunikacích jsou pulzní modulace. Reprezentace určitých kombinací bitů je zajištěna třemi způsoby rozlišení pulzů. Základní je pomocí amplitudy pulzu PAM, další podle polohy pulzu PPM a třetí šířkou pulzu PWM. Na obrázku 3.4 je ukázka PPM modulace.[10]

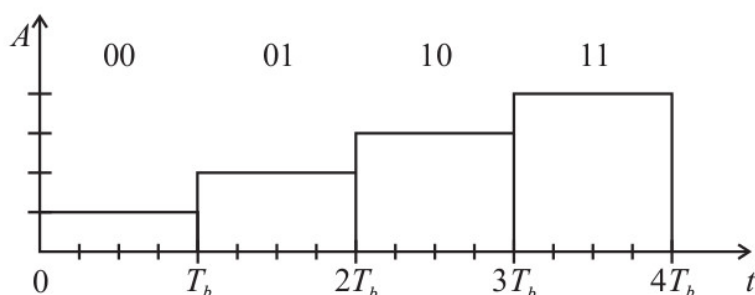
#### 3.4.1 PAM modulace

V této modulaci je informace vyjádřena výškou amplitudy jednotlivých pulzů. V PAM zůstává poloha pulzu a doba trvání pulzu neměnná, jen se mění amplituda pulzu. V tomto případě je často těžké rozeznat odlišné amplitudy pulzů, z důvodu přídavného šumu z okolního záření, proto se tento typ pulzní modulace moc nepoužívá. Na obrázku 3.3 je znázorněn princip PAM modulace. [10]

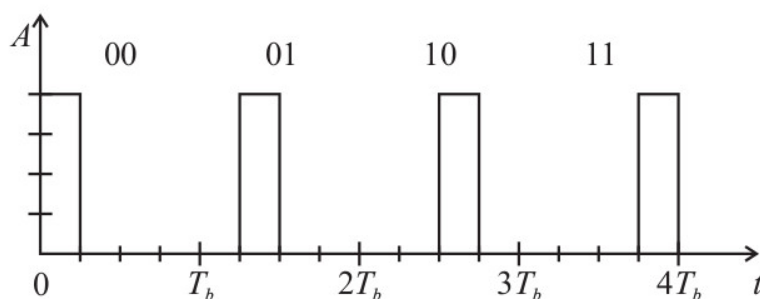
Dále se budu zabývat modulacemi, které jsou přímo zaměřené pro oblast VLC a jejich porovnáním v oblasti chybovosti, potřebné šířky pásma a výsílacího výkonu. V této oblasti se využívají OOK, PPM, DPPM, DPIM a DH-PIM.[17] Strom rozdělení Pulzních modulací je na obrázku 3.5

### 3 MODULACE

---



Obrázek 3.3: Pulzní amplitudová modulace [10]



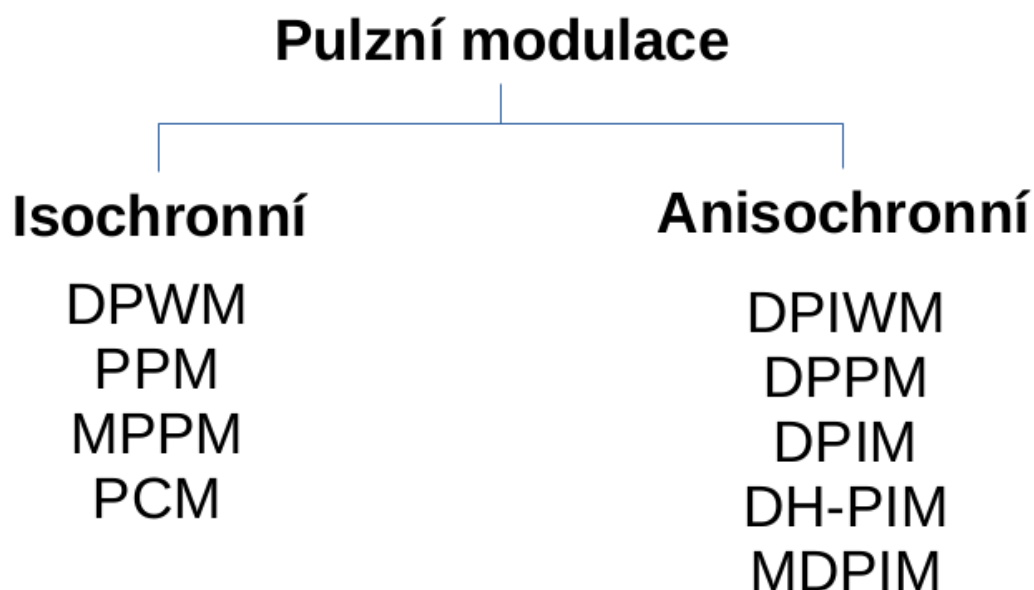
Obrázek 3.4: Pulzní polohová modulace [10]

#### 3.4.2 On-Off keying modulace OOK

V digitálních bezdrátových optických systémech je jako nejjednodušší způsobem modulace on-off klíčování. Je založena na intenzitní modulaci s přímou detekcí IM/DD, která byla představena v kapitole 3.2. Generování optických pulsů je dosaženo rozsvícením optického zdroje. Při logické úrovni 1 je poslán světelný impulz a při logické úrovni 0 je světelný zdroj vypnut úplně a žádný optický výkon na detektor nedopadá. Toto lze realizovat i okolo určitého pracovního bodu LED diody, kdy LED dioda nezhasíná úplně. [17]

#### 3.4.3 Pulzní polohová modulace PPM

U PPM je každý symbolový interval o délce trvání  $T$ , rozdělen do počtu  $L = 2^M$  sub-intervalů s dobou trvání  $\frac{T}{L}$ , kde  $M$  je počet bitů v jedné bitové skupině, která je přenášena jedním modulačním symbolem. V anglicky psaných literaturách je tento sub-interval nazýván jako "chip", i když posléze je nejčastěji používáno označení jako slot. U této modulace vysílač vysílá optický puls pouze po dobu jednoho slotu ("chips"). [18]



Obrázek 3.5: Strom rozdělení pulzních modulací [19]

#### 3.4.4 Digitální pulzní intervalová modulace DPIM

U této modulace není délka symbolu pevně dána. Informace je zprostředkována relativním odstupem od dvou po sobě jdoucích impulsů. Každý symbol začíná pulsem světla a následuje za ním  $k + 1$  prázdných slotů, určující danou informační hodnotu obohacenou o jeden další nulový slot.[18] Modulační symboly  $S_k$  ( $k$  je desítkové číslo vyjádřené symbolem) obsahuje  $k + 1$  prázdných slotů. Na straně demodulátoru, detektor přijme jeden symbol a poté spočítá počet nulových impulsů a jeden odečte. Tím získá vysílanou informaci a díky této modulaci není potřeba symbolové synchronizace, ale jen časové. To mnohem zjednodušuje implementaci systému. [17]

#### 3.4.5 Dvojitá pulzní intervalová modulace DH-PIM

Dvojitá pulzní intervalová modulace je složitější jak DPIM, avšak je z ní odvozena. Délka trvání symbolu není také pevně dána, jako je toho u DPIM modulace. Symbol začíná dvěma různými počátečními pulsy a každý symbol se skládá z  $\alpha + 1$  počátečních pulsů a  $m$  prázdných slotů, kde  $m$  je dáno jako: podle [18].

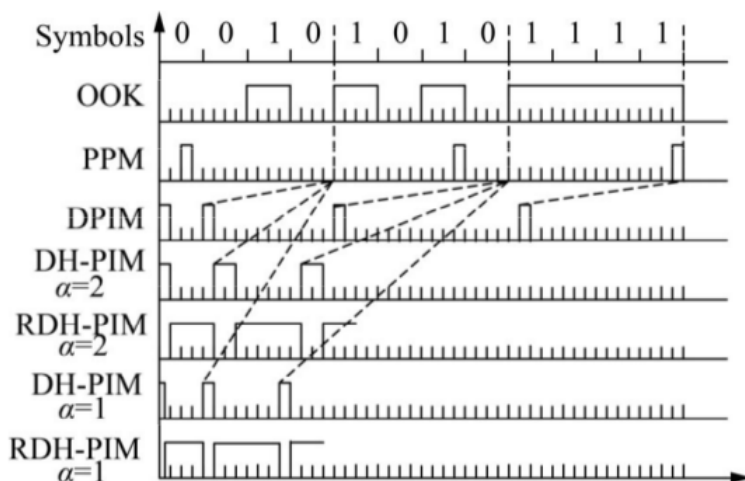
$$m = \begin{cases} k, & k < 2^{M-1} \\ 2^M - 1 - k, & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (3.7)$$

### 3 MODULACE

Každý počáteční puls se skládá z  $\alpha + 1$  slotů, s tím, že jsou dva druhy počátečních pulsů označené  $H_1, H_2$ . [18]

$$\begin{cases} H_1 : \frac{\alpha}{2} \text{ počáteční puls slotů} + (\frac{\alpha}{2} + 1) \text{ ochranných slotů,} & k < 2^{M-1} \\ H_2 : \alpha \text{ počáteční puls slotů} + 1 \text{ ochranný slot,} & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (3.8)$$

Symbol  $S_k$  je tvořen počátečním impulsem a poté následuje  $m$  prázdných slotů. Rozdíl počátečních impulsů je tedy v jejich šířce, kdy  $H_1$  je  $\alpha/2$  slotů a poté následuje  $(\alpha/2) + 1$  ochranných slotů, jak je vidět v 3.8. Puls  $H_2$  je široký jako jeden slot, následující jedním ochranným slotem. Pokud  $k < 2M - 1$  potom doba počátečního impulsu symbolu  $S_k$  je  $H_1$ , jinak  $H_2$ . [17] Modulace DH-PIM byla shledána ne jako efektivní řešení z důvodu neefektivní využití výkonu pro osvětlování, proto se zavedla negativní logika, která se snaží udržet LED diodu pokud možno co nejdéle v zapnutém stavu. Tím vznikne nová modulace RDH-PIM. Na obrázku 3.6 je vidět symbolová struktura modulací OOK, PPM, DPIM, DH-PIM a RDH-PIM, pro  $M = 4$ . Díky tomuto obrázku lze lépe pochopit principy těchto modulací. [18]



Obrázek 3.6: Struktura symbolu pro OOK, PPM, DPIM, DH-PIM a RDH-PIM, pro  $M = 4$  [18]

#### 3.4.6 Mnohonásobná digitální pulzní intervalová modulace MDPIM

V MDPIM každý blok  $M$ -bitového vstupu vyjádřených pomocí OOK dat s rychlostí  $R_b = T_b - 1$  je přiřazena jedna z  $L = 2M$  možných symbolů. Každý symbol začíná pulsem s amplitudou  $v$ , v případě, pokud nejvýznamnější bit je 0 a  $2v$  v případě nejvýznamnějšího bitu rovného 1. Poté následuje nulový ochranný slot a řada prázdných slotů  $k$ . Pro Symbol s amplitudou  $v$ , udává počet nulových slotů  $k$  desítkovou hodnotu binární kombinace dat. Pro amplitudu  $2v$  je to reverzně, kdy počet nul se s stoupající hodnotou klesá, viz tabulka 3.1. [19]

### 3 MODULACE

OOK	8-PPM	8-DPIM	8-DH-PIM	8-M-DPIM
000	10000000	10	100	10
001	01000000	100	1000	100
010	00100000	1000	10000	1000
011	00010000	10000	100000	10000
100	00001000	100000	110000	20000
101	00000100	1000000	11000	2000
110	00000010	10000000	1100	200
111	00000001	100000000	110	20

**Tabulka 3.1:** Mapování OOK kódu do 8-PPM, 8-DPIM, 8-DH-PIM a 8-MDPIM symbolů [19]

#### 3.4.7 Porovnání potřebné šířky pásma

Protože je šířka pásma limitována velkou kapacitou světelných receptorů v přijímači, proto je šířka pásma pro komunikaci ve viditelném spektru malá. Za podmínky stejné přenosové rychlosti, jsou porovnány požadavky na šířku pásma těchto pěti modulací. Pro OOK je datový tok vyjádřen jako  $R_b$ , kde je šířka pásma vyjádřena vzorcem 3.9. [17]

$$B_{OOK} = R_b \quad (3.9)$$

Pro modulaci PPM, kdy pro stejnou přenosovou rychlost  $R_b$ , je šířka pásma vyjádřena vzorcem 3.10. [17]

$$B_{PPM} = \frac{2^M}{M} B_{OOK} \quad (3.10)$$

Pro modulaci DPIM, pro stejnou přenosovou rychlost  $R_b$ , je šířka pásma vyjádřena jako vzorec 3.11. [17]

$$B_{DPIM} = \frac{2^M + 3}{2M} B_{OOK} \quad (3.11)$$

Pro modulaci DPPM je šířka pásma vyjádřena vzorcem 3.12. [17]

$$B_{DPPM} = \frac{2^M + 1}{2M} B_{OOK} \quad (3.12)$$

Poté je šířka pásma  $B_{DH-PIM}$  vyjádřena vzorcem 3.13. [17]

$$B_{DH-PIM} = \frac{2^{M-1} + 2\alpha + 1}{2M} B_{OOK} \quad (3.13)$$

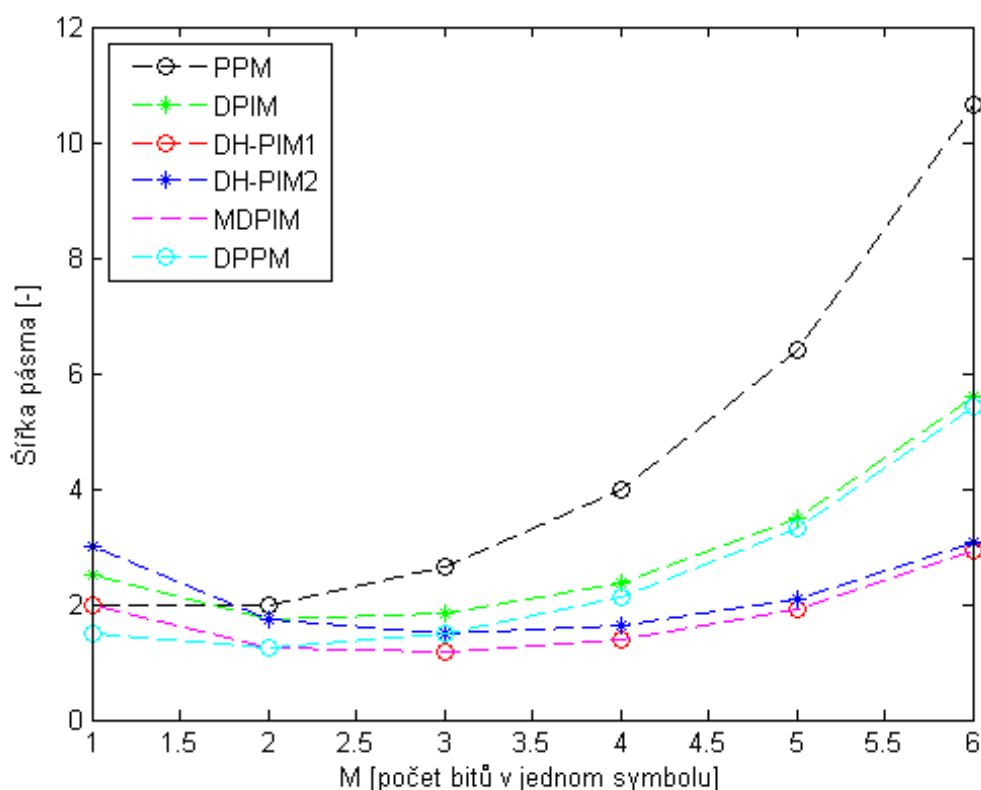
Jako poslední je vzorec 3.14 pro vyjádření šířky pásma modulace MDPIM [19].

$$B_{MDPIM} = \frac{2^{M-1} + 3}{2M} B_{OOK} \quad (3.14)$$

Všechny tyto vyjádření šířek pásma pro jednotlivé modulace byli pomocí matlabu vykresleny do grafu, který můžete vidět na obrázku 3.7. [17] Jak je z grafu patrné, tak s

### 3 MODULACE

rostoucím počtem stavů  $M$  u všech modulací narůstá potřeba větší šířky pásma. Nejhuře je na tom modulace PPM, za ní DPIM a DPPM. Nejlépe na tom jsou modulace DH-PIM a MD-PIM. Díky tomuto srovnání, lze jednodušeji vybrat příslušnou modulaci a příslušný počet stavů. Všechny tyto modulace jsou náročnější na šířku pásma než modulace OOK, která byla zvolena jako hodnota 1.



**Obrázek 3.7:** Porovnání potřebné šířky pásma pro modulace PPM, DPIM, DHPIM1, DHPIM2, MD-PIM a DPPM

#### 3.4.8 Porovnání průměrného vysílacího výkonu

Protože je potřeba dodržet bezpečnost očí pro komunikaci ve viditelném spektru, je vysílací optický výkon dosti omezen. Proto je nutné, zlepšit efektivitu využití optické energie. Pro OOK (NRZ), za předpokladu, že výkon  $P_1$  je rozsvícení optického pulzu "1", kde pravděpodobnost jedničky "1" a nuly "0" je stejná, pak průměrná hodnota výkonu je vyjádřena pomocí vzorce 3.15. [17]

$$P_{OOK} = \frac{P_1}{2} \quad (3.15)$$

### 3 MODULACE

I když PPM obsahuje  $2M$  slotů v jednom PPM symbolu, pouze jeden slot posílá optický pulz. Proto průměrný vysílací výkon pro PPM je vyjádřeno vztahem 3.16.[17]

$$P_{PPM} = \frac{P_1}{2^M} = \frac{P_{OOK}}{2^{M-1}} \quad (3.16)$$

Jeden DPPM symbol obsahuje  $\frac{2^{M+1}}{2}$  slotů, poté je průměrný potřebný výkon vyjádřen jako 3.17.

$$P_{DPPM} = \frac{2P_1}{2^M + 1} = \frac{4P_{OOK}}{2^M + 1} \quad (3.17)$$

U modulace DPIM je vyjádřený průměrný vysílací výkon jako vztah 3.18.

$$P_{DPIM} = \frac{2P_1}{2^M + 3} = \frac{4P_{OOK}}{2^M + 3} \quad (3.18)$$

U modulace DH-PIM je průměrný vysílací výkon vyjádřen pomocí vztahu 3.19. [18]

$$P_{DH-PIM} = \frac{6\alpha}{2^M + 4\alpha + 2} P_{OOK} \quad (3.19)$$

Jak již bylo zmíněno, nová modulace RDH-PIM, která vznikla reverzní logikou od modulace DH-PIM, má vyjádření pro průměrný vysílací výkon podle vztahu 3.20.[18]

$$P_{RDH-PIM} = \frac{2\alpha + 2^{M+1} + 4}{4\alpha + 2^M + 2} \quad (3.20)$$

Výsledné normalizované průměrné výkony pro srovnání s OOK jsou zobrazeny na obrázku 3.8, ze simulací v matlabu. Jak je vidět, tak průměrný vysílací výkon pro modulace PPM, DPIM, DPPM a DH-PIM je nižší, než pro modulaci OOK, se zvyšujícím se  $M$ . Výsledek je zřejmý, že průměrný vysílací výkon se s rostoucím  $M$  snižuje a to nejvíce pro PPM modulaci. Pokud nebudu brát v potaz modulaci RDH-PIM, tak největší průměrný výkon dosahuje modulace DH-PIM. Průměrný přenos výkonu všeobecně klesá s rostoucím  $M$ , až na OOK.[17] U RDH-PIM je tomu tak obráceně, tam s rostoucím  $M$  průměrný vysílací výkon roste. Toho je dobré využít tam, kde je potřeba při přenosu vyššího optického výkonu například v podobě osvětlení prostorů.

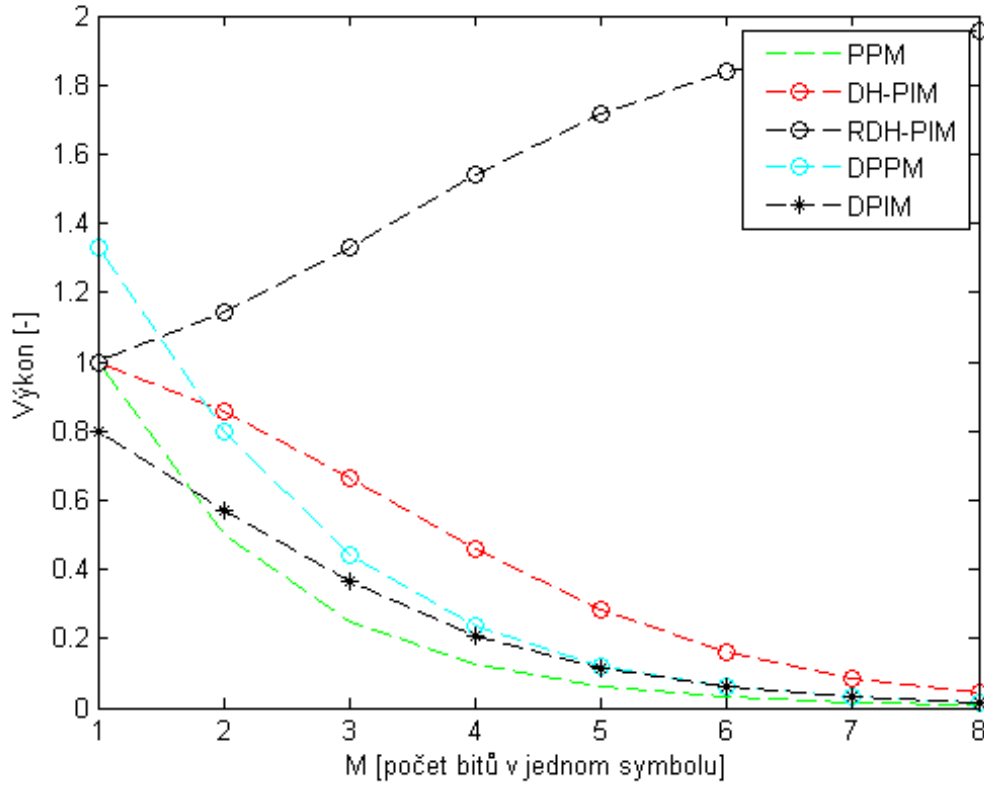
#### 3.4.9 Porovnání vysílací kapacity

Velikost přenosové kapacity představuje schopnost přenosu informace za jednotku času. To je také velmi důležitý parametr pro atmosférické bezdrátové optické komunikace. S podmínkou, že jeden časový interval má stejnou šířku, byli modulace OOK, PPM, DPPM, DPIM, DH-PIM analyzovány a porovnány. Za předpokladu, že šířka časového intervalu je  $\tau$ , poté je průměrná přenosová kapacita modulace OOK určena vztahem 3.21.[17]

$$C_{OOK} = \frac{1}{\tau} \quad (3.21)$$

Průměrná délka symbolu pro modulaci PPM je vyjádřena vztahem 3.22, a poté je průměrná přenosová kapacita určena vztahem 3.23.[17]

### 3 MODULACE



**Obrázek 3.8:** Porovnání průměrného výkonu pro modulace PPM, DPPM, DPIM, DH-PIM pro  $\alpha = 1$  a RDH-PIM

$$L_{PPM} = 2^M \tau \quad (3.22)$$

$$C_{PPM} = \frac{M}{2^M \tau} = \frac{M}{2^M} C_{OOK} \quad (3.23)$$

Pro modulaci DPPM je průměrná délka symbolu vyjádřena jako 3.24. Z toho lze vyjádřit přenosová kapacita, kde její vyjádření je vidět na vzorci 3.25.[17]

$$L_{DPPM} = \frac{2^M}{2\tau} \quad (3.24)$$

$$C_{DPPM} = \frac{2M}{(2^M + 1)\tau} = \frac{2M}{2^M + 1} C_{OOK} \quad (3.25)$$

Průměrná délka symbolu modulace DPIM je vyjádřena jako 3.26. Z toho je určena přenosová kapacita modulace DPIM vzorcem 3.27.[17]

$$L_{DPIM} = \frac{2^M - 3}{2\tau} \quad (3.26)$$



### 3 MODULACE

$$C_{DPIM} = \frac{2M}{(2^M - 3)\tau} = \frac{2M}{2^M - 3} C_{OOK} \quad (3.27)$$

Pro modulaci DH-PIM je průměrná délka symbolu vyjádřena vzorcem 3.28. Přenosová kapacita je poté vyjádřena podle vzorce 3.29.[17]

$$L_{DH-PIM} = \frac{2^M + 2\alpha + 1}{2\tau} \quad (3.28)$$

$$C_{DH-PIM} = \frac{2M}{(2^M + 2\alpha + 1)\tau} = \frac{2M}{2^M + 2\alpha + 1} C_{OOK} \quad (3.29)$$

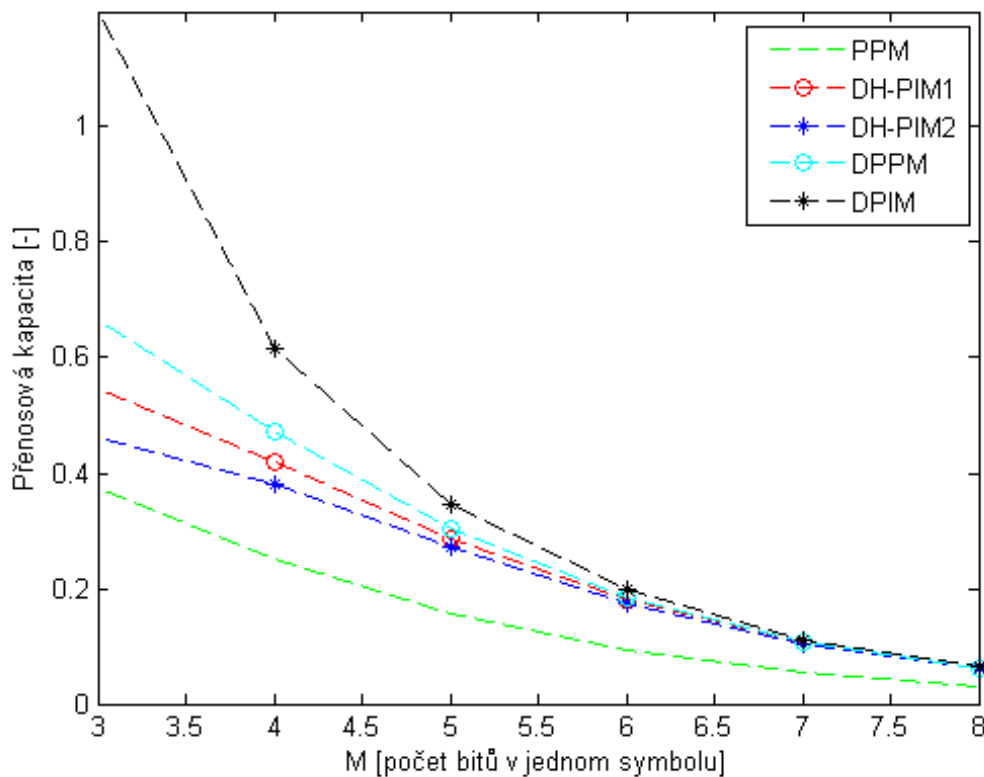
Výsledky ze simulací jsou vidět na obrázku 3.9. Tento graf byl vytvořen pomocí matlabu. Výsledky jsou v grafu zobrazeny až od  $M = 3$ , jelikož modulace DPIM pro hodnotu  $M = 2$  dosahuje normalizované přenosové kapacity 4. V materiálu, z kterého bylo čerpáno, zobrazují také graf od  $M = 3$ , aniž by se zmiňovali proč. Já předpokládám, že pro tak malé hodnoty  $M$  nejsou výsledky přesné a navíc nevyužívané, proto je tento graf zobrazen až od hodnoty  $M = 3$ . [17] Z grafu na obrázku 3.9 je zřejmé, že PPM dosahuje nejmenší přenosové kapacity, zatímco modulace DPIM dosahuje nejvyšších hodnot. Následuje modulace DPPM a za ní těsně po sobě jdoucí modulace DH-PIM pro  $\alpha = 1$  a DH-PIM pro  $\alpha = 2$ . Modulace MDPIIM v tomto případě nebyla vyjádřena, jelikož materiály o ní v tomto směru nepojednávali. Všeobecně s rostoucí hodnotou  $M$ , klesí přenosová kapacita všech uvedených modulací, až na modulaci OOK.

#### 3.5 Digitální modulace

U digitálních modulací, je modulační signál digitální, který dosahuje pouze dvou hodnot, a to log.1 a log.0. Proto se parametry nosné vlny mění skokem v závislosti na okamžité hodnotě digitálního modulačního signálu. Podle ovlivněného parametru nosné vlny, rozlišujeme tři základní typy digitálních modulací.[11]

- Modulace ASK - modulace pomocí změny amplitudy, neboli klíčování amplitudovým posuvem (zdvihem). Tato modulace nemá ve svém základě výhodné vlastnosti, proto se nepoužívá.[11]
- Modulace FSK - modulace pomocí změny frekvence, neboli klíčování frekvenčním posuvem (zdvihem).[11]
- Modulace PSK - modulace pomocí změny fáze, neboli klíčování fázovým posuvem (zdvihem).[11]

U diskrétních modulací se zavedli vícestavové modulace, pro zvětšení přenosové kapacity. Modulovaný parametr nosné vlny může nabývat jednoho z celkového počtu  $M$  stavů. Ve vzorci 3.30 je  $M$  počet stavů a  $n$  je počet bitů přenesených v jednom stavu. Ve vzorci 3.31 je výpočet počtu bitů  $n$  přenesených v počtu stavech  $M$ . Pokud se použije vícestavová modulace pro přenos informace ve stejné šířce pásma jako při jednostavové modulaci, tak vícestavová modulace dosáhne větší přenosové kapacity.[13]



**Obrázek 3.9:** Porovnání přenosové kapacity modulací PPM, DH-PIM ( $\alpha = 1$ ), DH-PIM ( $\alpha = 2$ ), DPPM a DPIM

$$M = 2^n \quad (3.30)$$

$$n = \log_2 M \quad (3.31)$$

Například z vícestavové modulace s kmitočtovým klíčováním MFSK je čtyř stavová QFSK, také označována jako 4FSK. U ní zaujímá nosná vlna vždy jeden ze čtyř diskretních kmitočtů. Každý ze čtyř kmitočtů odpovídá dvojici bitů. Stejně tak se dá vytvořit čtyřstavová modulace klíčována fázovým posuvem QPSK. [13]

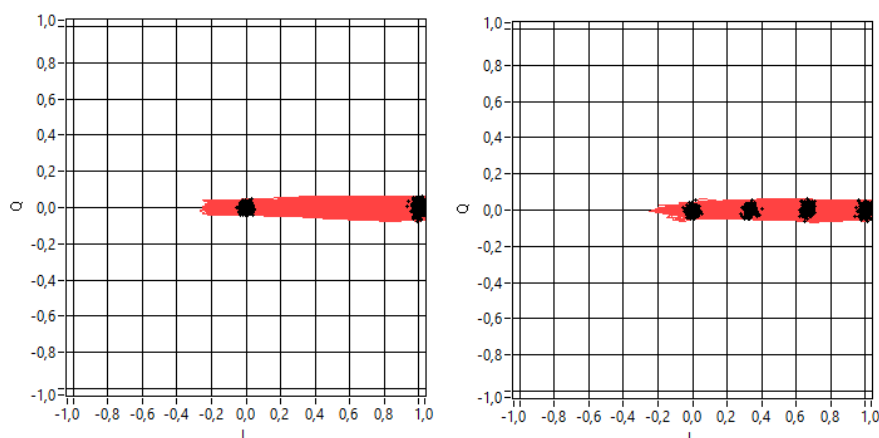
Pro modulace PSK se využívá zobrazení jejich fázových stavů v komplexní rovině pomocí fázorů, popřípadě jen jejich koncových bodů. Reálná osa je označena písmenem I, jako In-phase, neboli česky synfázní složka. Imaginární osa je označena symbolem Q, jako Quadrature, neboli kvadraturní. Tato rovina se nazývá rovina IQ a zobrazené body v této rovině potom vytvářejí konstelační diagram, také nazývaný stavový diagram..[13]

### 3 MODULACE

#### 3.5.1 ASK modulace

Modulace s amplitudovým klíčováním přenáší binární informace pomocí amplitudy modulovaného signálu. Modulace BASK(2ASK) je dvoustavová modulace s klíčováním amplitudovým zdvihem. Tato modulace vznikne ovlivněním nosného signálu modulačním signálem s diskrétními stavy. Po dobu logické "1" je vysílána nosná vlna s daným kmitočtem a po dobu logické "0" není vysílán žádný signál. [12]

Modulace typu ASK jsou dosti náchylné na rušení v přenosovém kanále, protože je informace přenášena amplitudou nosného signálu, proto je méně používána. Nejčastěji se s tímto typem digitální modulace můžeme setkat v kombinaci s modulacemi typu PSK, kdy po jejich sloučení vznikne QAM modulace. Pro vícestavovou modulaci MASK je potřeba zavést více amplitudových hladin, což klade větší nároky na výkon vysílače. Zvýšením počtu stavů, se zhoršuje odolnost vůči rušení. [12] Zobrazení stavů v rovině IQ pro dvoustavovou modulaci BASK a čtyřstavovou modulaci QASK je na obrázku 3.10.



Obrázek 3.10: Vektorový diagram modulace BASK (2ASK) a QASK (4ASK)

#### 3.5.2 FSK modulace

FSK modulace s nejnižším řádem je BFSK(2FSK) modulace, která nabývá dvou stavů. Nosná vlna má konstantní amplitudu. Kmitočet této modulace se mění v rytmu digitálního binárního modulačního signálu. Kmitočet se mění mezi dvěma signalizačními kmitočty 3.32.  $f_c$  je nominální kmitočet nemodulované nosné vlny, který se rovná jako 3.33. Odchylka signalizačního kmitočtu od kmitočtu nosné vlny, neboli kmitočtový zdvih (deviace, ofset) se značí  $\Delta f$ . Dvojnásobný kmitočtový zdvih se rovná  $f = f_2 - f_1$  a je značen také jako zdvih špička-špička. Modulovaný signál  $S_{FSK}(t)$  lze vyjádřit obecnými vztahy 3.34 a 3.35. [13]

$$\begin{aligned} f_1 &= f_c - \Delta f \\ f_2 &= f_c + \Delta f \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$f_c = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.33)$$

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi(f_c + \Delta f)t], \text{ pro } 0 \leq t \leq T_b \text{ (binární 1)} \quad (3.34)$$

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos[2\pi(f_c - \Delta f)t], \text{ pro } 0 \leq t \leq T_b \text{ (binární 0)} \quad (3.35)$$

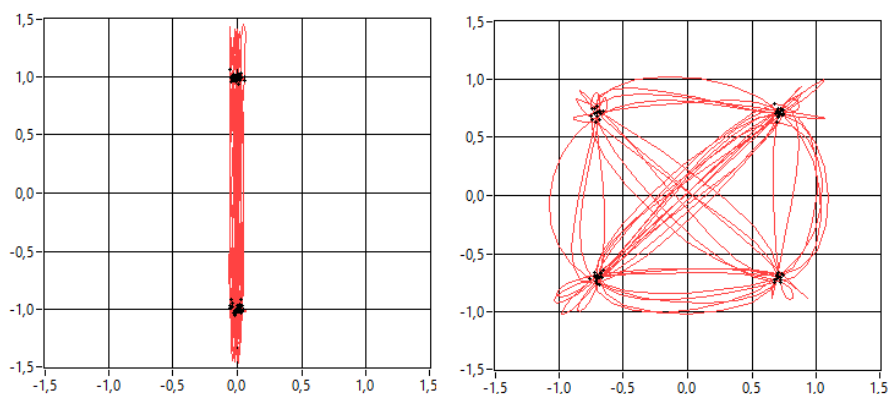
První část vzorce pod odmocninou udává amplitudu modulované nosné vlny BFSK.  $E_b$  je energie modulovaného signálu na jeden modulační bit a  $T_b$  je bitová perioda. Modulátor BFSK lze jednoduše realizovat pomocí dvou frekvenčních generátorů s kmitočty  $f_1$  a  $f_2$ , že na výstup se tyto frekvenční generátory přepínají v rytmu modulačního signálu. Více v [13].

#### 3.5.3 PSK modulace

U modulací s klíčováním fázovým posuvem, datový signál ovlivňuje fázi nosné vlny, zatímco amplituda nosné vlny zůstává neměnná. U dvoustavové modulace BPSK(2PSK) nabývá fáze dvou diskretních stavů, například  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . [13] BPSK je velmi odolná vůči šumu, rušení a dalším nežádoucím vlivům. Odolnost této modulace je způsobena díky velkým rozestupům dvou stavů od sebe. Jenže toto způsobuje i velkou nevýhodu, kdy je modulace značně náročná na šířku vysokofrekvenčního pásma. Tyto nároky se dají snížit zvýšením počtu stavů modulací. Jestliže se počet fázových stavů zvětšuje, snižuje se jejich vzájemný rozestup, za předpokladu, že jsou na stejné kružnici, tedy mají stejnou amplitudu. Díky snížení rozestupů stavů, narůstá chybovost přenosu. U více stavových modulací MPSK, může nosná vlna nabývat vždy jeden z  $M$  možných fázových stavů. Určení signálu MPSK v časové oblasti je podle vztahu 3.36. [13]

$$S_{MPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos[2\pi f_c t + (i-1)\frac{2\pi}{M}], \text{ pro } 0 \leq t \leq T_s, i = 1, 2, \dots, M \quad (3.36)$$

Čtyř stavová modulace QPSK(Quadrature Phase Shift keying), je nejvýznamnější modulace z kategorie vícestavových modulací MPSK. To je díky tomu, že v řadě aplikací představuje vhodný kompromis mezi dobrou výkonovou a spektrální účinností. Jak je celkově u modulací pomocí klíčování fázovým posuvem, nabývá amplituda u QPSK modulace konstantní hodnoty, zatímco fáze nosné vlny může nabývat jednu ze čtyř možných hodnot, například  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  a  $315^\circ$ . Jednomu stavu odpovídá jedna bitová dvojice, neboli dibit. Více v [13]. Zobrazení stavů v rovině IQ pro dvoustavovou modulaci BPSK a čtyřstavovou modulaci QPSK je na obrázku 3.11. [13]



**Obrázek 3.11:** Vektorový diagram modulace BPSK(2PSK) a QPSK(4PSK)

#### 3.5.4 QAM modulace

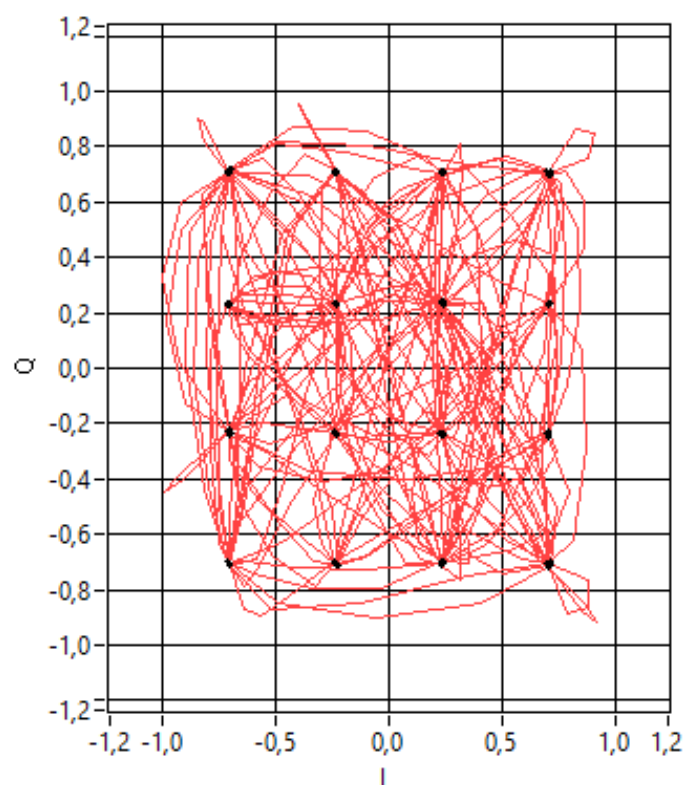
Jak již bylo psáno v podkapitole 3.5.1, spojením modulace ASK a PSK vznikne modulace QAM. V této modulaci se tedy modulačním signálem ovlivňuje nejen amplituda, ale i fáze nosné vlny. Využívají se většinou v aplikacích, kde je potřeba více stavů, neboli větší spektrální účinnost. U více stavových modulací MQAM, se spojují dva nebo více modulačních bitů do  $n$ -bitových kódových skupin, neboli symbolů. Pro  $M$  platí vztah 3.37. [13]

$$M = 2^n \quad (3.37)$$

Tyto symboly jsou poté vysílány jako signálové prvky  $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ , které trvají po dobu jedné symbolové periody  $T_s$  a jsou vyjádřeny vztahem 3.38, kde  $a_i, b_i$  jsou páry nezávislých celých čísel, udávající polohu jednotlivých bodů konstelačního diagramu.  $E_{min}$  je energie signálového prvku s nejmenší amplitudou. [13]

$$S_{MQAM}(t) = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_c t); 0 \leq t \leq T_s, i = 1, 2, \dots, M \quad (3.38)$$

Dvě kvadrurní nosné vlny tvoří signál MQAM, z nichž každá je amplitudově klíčována soustavou diskretních modulačních signálů. Jedna kvadrurní nosná vlna sama představuje signál ASK. U modulace 16QAM jsou kvadrurní i synfázní vlna I klíčovány čtyřmi modulačními úrovněmi. [13] Na obrázku 3.12 je znázorněn vektorový diagram modulace 16QAM.



Obrázek 3.12: Vektorový diagram modulační 16QAM

## 4 Standart 802.11.7

IEEE standart definující fyzickou PHY vrstvu a přístupovou MAC vrstvu pro optické bezvláknové komunikace viditelným světlem na kratší vzdálenosti.

Standart definuje tři typy fyzické vrstvy PHY. PHY I je určena pro venkovní užití, kde je potřeba jen malých přenosových rychlostí. Tento typ využívá modulaci OOK a variabilní polohovou pulzní modulaci VPPM s přenosovými rychlostmi v řádech desítek až stovek kbit/s.[1] PHY II je určena pro vnitřní použití se středně rychlými přenosy dat. Tento režim používá OOK a VPPM s přenosovými rychlostmi v řádech desítek Mbit/s.[1] PHY III je určena pro aplikace s klíčováním barevným posuvem CSK, které mají více zdrojů světla a detektorů. Tento režim používá CSK s rychlostí přenosu dat v řádech desítek Mbit/s.[1]

V tabulce 4.1 jsou vlastnosti fyzické vrstvy PHY I.

**Tabulka 4.1:** Fyzická vrstva PHY I [1]

Modulace	Linkový kód	Taktovací frekvence	FEC		Přenosová rychlost
			Vnější kód (RS)	Vnitřní kód (CC)	
OOK	Manchester	200 kHz	(15,7)	1/4	11,67 kb/s
			(15,11)	1/3	24,44 kb/s
			(15,15)	2/3	48,89 kb/s
			(15,11)	není	73,3 kb/s
			není	není	100 kb/s
VPPM	4B6B	400 kHz	(15,2)	není	35,56 kb/s
			(15,4)	není	71,11 kb/s
			(15,7)	není	124,4 kb/s
			není	není	266,6 kb/s

### 4.1 Linkové kódy

Linkové kódy mohou pomoci při základních pulzních modulacích s zachováním konstantního vysílaného optického výkonu v závislosti na vysílaných datech. Všechny modely fyzické vrstvy PHY I používající VPPM mohou využít linkové kódování 4B6B. Tento linkový kód rozšíří čtyř bitovou sekvenci na bitovou sekvenci o šesti bitech. Počet nul a jedniček v každém symbolu je vždy roven tří, díky tomu je vždy pracovní cyklus 50 %. Díky tomuto linkovému kódování se sníží přenosová rychlost, za to se zvýší možnost detekce chyby a umožní se jednoduchá obnova časové synchronizace. [1].

**Tabulka 4.2:** Linkový kód Manchester [1]

bit	Symbol
0	01
1	10

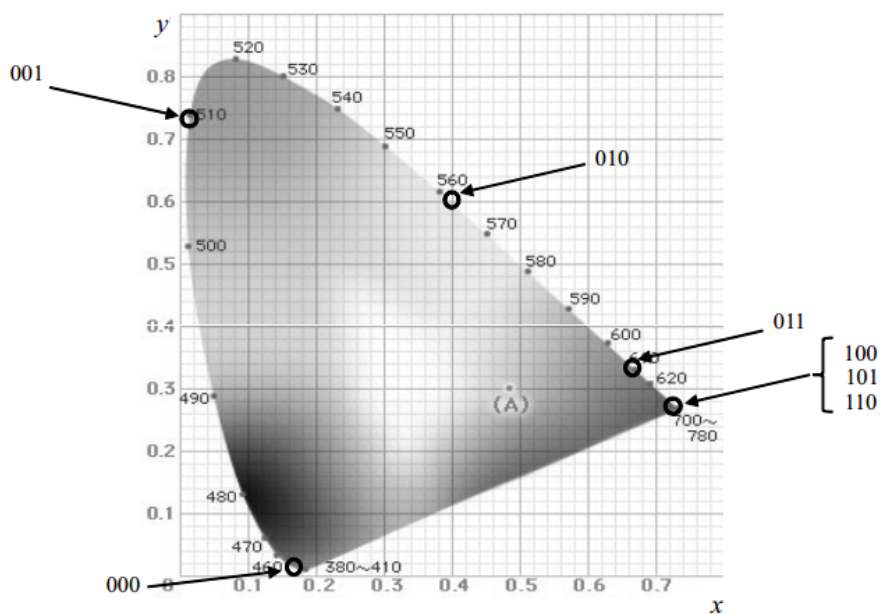
Při použití modulace OOK se dá využít linkový kód Manchester, který rozšíří jeden bit na dva bity, jak je ukázáno v tabulce 4.2. [1]

### 4.2 CSK modulace

V fyzický vrstvě PHY III je definován standart pro modulaci pomocí spektra světla. Signál CSK je generován pomocí tří barevných světelných zdrojů. Tyto tři zdroje rozhodují, o centru vlnové délky světla a určují xy barevné souřadnice. Tabulka 4.3 ukazuje xy souřadnice barvy světla a hodnoty dat. Na obrázku 4.1 je zobrazení souřadnic pro jednotlivé barvy světla. [1]

**Tabulka 4.3:** Souřadnice barev pro jednotlivá data [1]

Pásmo [nm]	Kód	Střed [nm]	(x, y)
380-478	000	429	(0.169, 0.007)
478-540	001	509	(0.011, 0.733)
540-588	010	564	(0.402, 0.597)
588-633	011	611	(0.669, 0.331)
633-679	100	656	(0.729, 0.271)
679-726	101	703	(0.734, 0.265)
726-780	110	753	(0.734, 0.265)

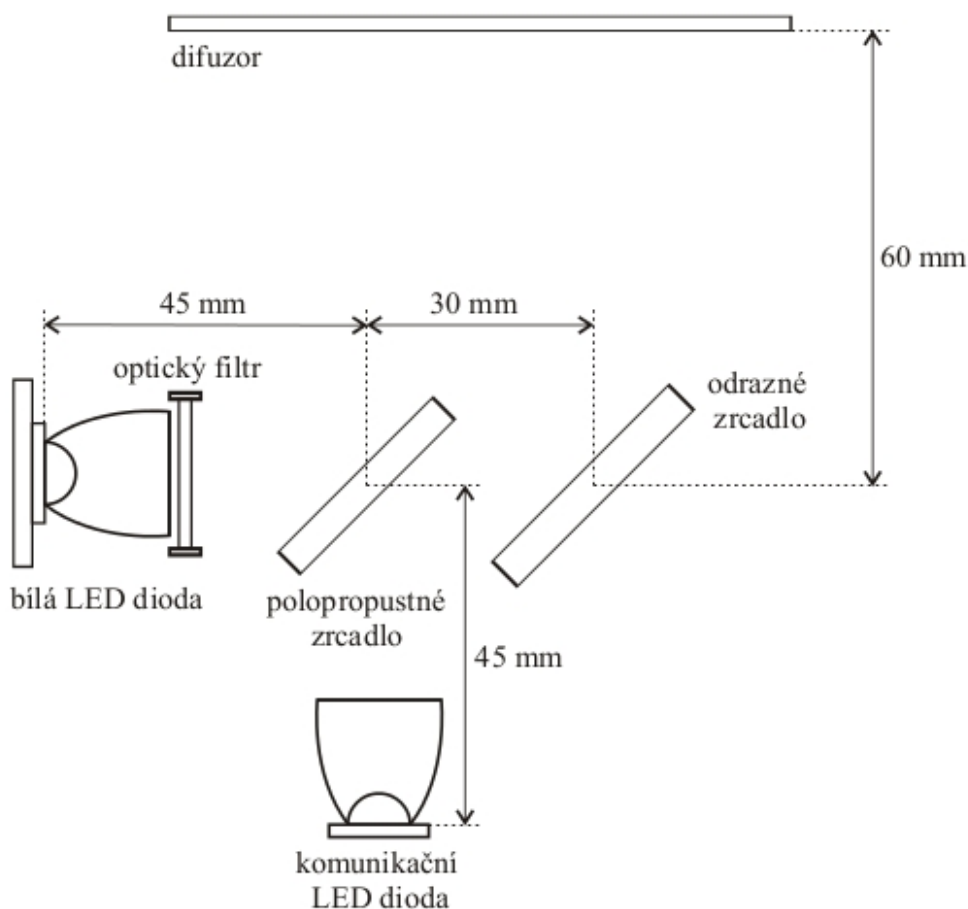


**Obrázek 4.1:** Souřadnice barev [1]



### 5 Základní koncept vysílače

Tento vysílač má originálně řešenou spektrální charakteristiku vyzařovaného světla. Pro osvětlovací účely je zde bílá výkonová LED dioda. Její úzká spektrální část je pomocí filtru potlačena a nahrazena jiným zdrojem, pro zpětnou rekonstrukci původního bílého světla. Druhý zdroj s úzkou spektrální šířkou je modulován a tím zajišťuje přenos informace. Díky tomuto řešení jsou odstraněny nedostatky komunikace bílým světlem, jako je spínání velkého napájecího proudu a setrvačnost fosforu při vytváření bílého světla pomocí vrstvy luminoforu.[20]



Obrázek 5.1: Koncept vysílače[20]

Na obrázku 5.1 je znázorněn koncept vysílače, kde je znázorněna bílá LED dioda pro osvětlovací funkci. Tato LED dioda s označením LXHL-LW6C je od společnosti Philips o výkonu 5 W. Před touto LED diodou je optický filtr NT67-119 typu úzkopásmová zádrž od firmy Edmund Optics. Tento optický filtr způsobí změnu vyzařovaného světla. Jako komunikační LED dioda byla využita jedno wattová dioda LL-HP60MPGE. Na oboje

## 5 ZÁKLADNÍ KONCEPT VYSÍLAČE

---

LED diody byl nasazen Parabolický reflektor od prodejce Roithner LaserTechnik GmbH. Tyto parabolické reflektory nasměrovávají vyzářené světlo přes polopropustné zrcadlo NT49-754 od firmy Edmund Optics. Jelikož polovina výkonu se ztratí na polopropustném zrcadle, je zde ještě odrazné zrcadlo NT63-167. Lepší rozprostření světla a lepší promíchání světél zajišťuje difuzor NT43-725.[20]

### 5.1 LED dioda LXHL-LW6C

Tato výkonová bílá LED dioda má proud v propustném směru 700 mA. Při této hodnotě protékajícího proudu udává výrobce v katalogovém listu její barvu světla 5500 K. Již zmíněném protékajícím proudu odpovídá světelný tok 120 lm. Účel této Výkonové LED diody je pro osvětlování větších prostor, proto její vyzařovací úhel je 120 °.[21]

### 5.2 LED dioda LL-HP60MPGE

Tato LED dioda má výkon 1W a vysílá světlo o zelené barvě, které odpovídá vlnové délce 515 nm. Její maximální propustný proud je 350 mA, zatímco pro pulzující propustný proud zvládne i 700 mA, pokud puls je kratší jak 100  $\mu$ s a střída je 0,25. Jak udává výrobce v katalogovém listu, dioda dosahuje světelného toku 80 lm při již zmíněném propustném proudu. Pro tento navržený systém je potřeba LED diodu napájet protékajícím proudem o hodnotě 105 mA a to z důvodu zpětné rekonstrukce bílého světla.[22]

### 5.3 Optický filtr NT67-119

Tento optický filtr typu úzkopásmová zádrž odfiltrovává část spektra z bílého světla emitovaného bílou výkonovou LED diodou LXHL-LW6C. Centrální vlnová délka tohoto optického filtru je 532 nm. Šířka spektrální charakteristiky je přibližně 26,6 nm. V hodnotách spektra mimo úzkopásmovou zádrž, optický filtr propouští 90 % světla. Na centrální vlnové délce optický filtr odráží 99 % světla.[20]

### 5.4 Polopropustné zrcadlo NT49-754

Polopropustné zrcadlo promíchává světelné svazky z obou LED diod. Jako velkou výhodou polopropustného zrcadla je překrytí světelných svazků na úkor ztráty části optického výkonu. Poměr polopropustného zrcadla je 50/50 % s čtvercovitým tvarem o rozměrech 35 × 35 mm, tloušťkou 3 mm a přenosem 50 %.[20]

### 5.5 Odrazné zrcadlo NT63-167

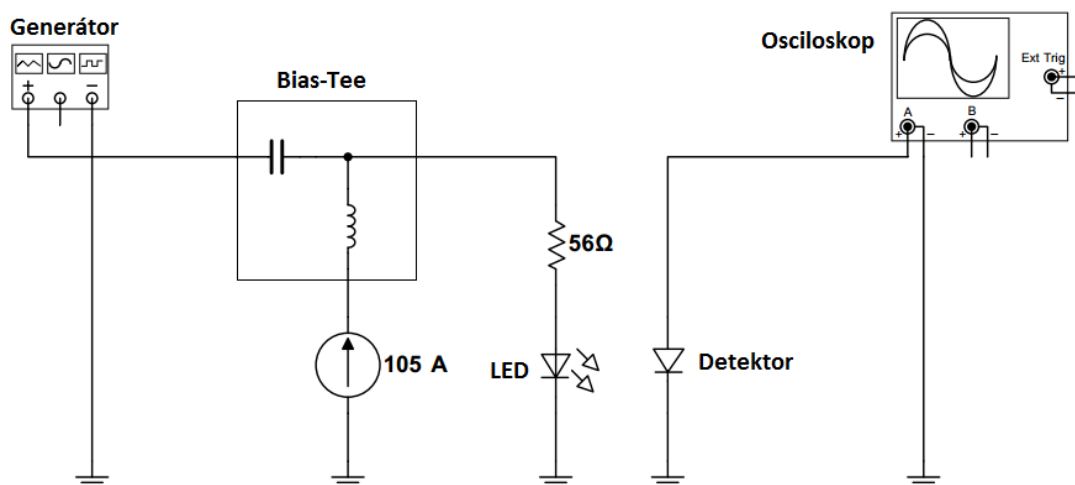
Do konstrukce bylo začleněno odrazné zrcadlo pro maximální využití optického výkonu z obou LED diod. Výrobce udává u tohoto zrcadla odrazivost více než 95 % na spektrálním rozsahu 450 - 650 nm.[20]

### 5.6 Difuzor

Difuzor vyrobený z pískovaného skla rozprostírá optický výkon jím procházející. To napomáhá promíchávat optické svazky z obou LED diod. Rozměry difuzoru jsou  $100 \times 10 \times 1,6$  mm. [20]

## 6 Měření frekvenční odezvy komunikační LED diody

Frekvenční odezva LED diody se měří s použitím fixního klidového proudu, který se překrývá s malým střídavým signálem. Fotodioda na druhé straně detekuje modulovaný fotoelektrický signál. Zaznamenává se velikost rozkmitu střídavé složky. Po určení šířky pásma pro úroveň 3 dB, je určena frekvenční odezva LED diody. V mém měření jsem použil pro střídavou složku signálu generátor funkcí SMB 100A od firmy ROHDE&SCHWARZ. Tato střídavá složka byla sečtena v obvodu Bias-Tee (zx85-12g-s+) se stejnosměrnou složkou, která je nastavena na 105 mA pomocí jednoduchého proudového zdroje se zapojením stabilizátoru napětí LM317T. Tento jednoduchý proudový zdroj byl napájen dvanácti volty z laboratorního zdroje. Tento použitý stabilizátor napětí dokáže zvládnout na výstupu až 1,5 A. K LED diodě byl do série zapojen odpor o hodnotě 56  $\Omega$ . Na detekční straně byl využit fotodetektor PDA10A-EC od firmy THORLABS, který byl připojen k osciloskopu waveRunner 204xi od firmy LeCroy. Pomocí osciloskopu jsem změřil velikost rozkmitu fotoelektrického signálu. Měřit jsem začal u 200 kHz, protože to byla mezní hodnota pro již zmiňovaný obvod Bias-Tee. Zapojení pro měření frekvenční odezvy LED diody je na obrázku 6.1.



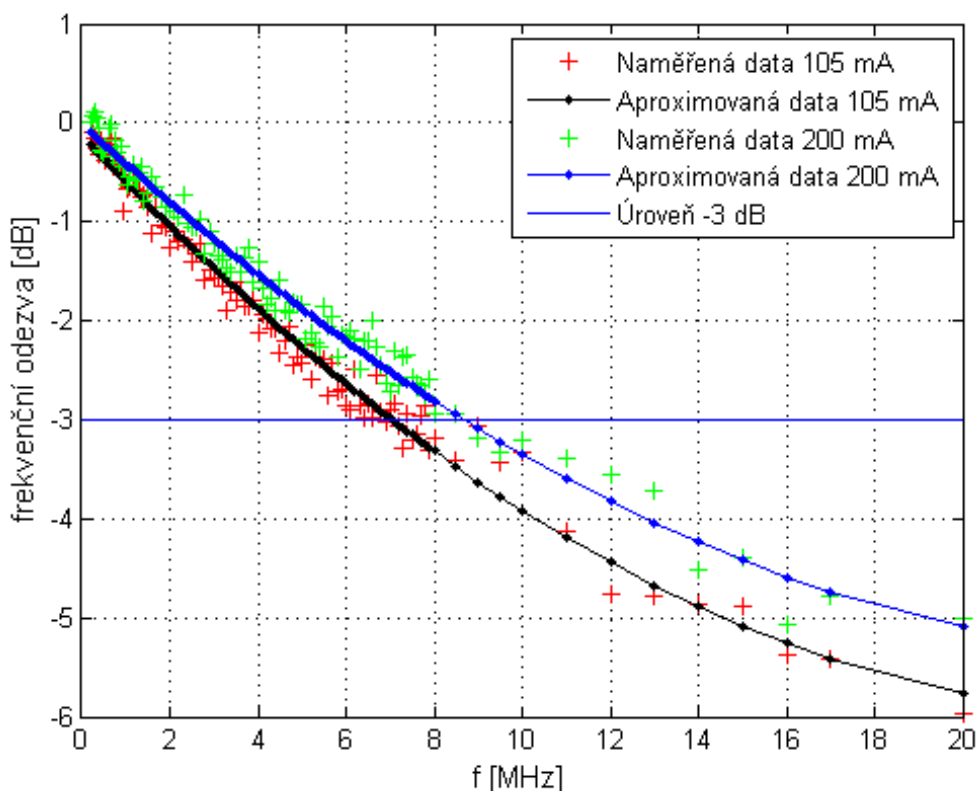
Obrázek 6.1: Schéma měření frekvenční odezvy LED diody

Naměřené výsledky jsem aproximoval pomocí metody nejmenších čtverců v programu MATLAB a výsledek jsem vykreslil do grafu, který je vidět na obrázku 6.2. Jak je z grafu zřejmé, tak měřená LED dioda dosahuje frekvenční odezvy pro úroveň 3 dB do 7 MHz.

Protože již zmiňovaný výzkum [4] v kapitole 2.5 zjistil, že na proudové hustotě na čipu závisí šířka pásma LED diody, rozhodl jsem se změřit šířku pásma i pro propustný proud 200 mA. Měření bylo realizováno stejně jako předchozí, jen s tím rozdílem, že byl nahrazen proudový zdroj výkonovým předřadným odporem a ampérmetrem, díky čemuž jsem mohl nastavit pracovní proud na již zmiňovaných 200 mA. Výsledek je zobrazen společně s prvním měřením v grafu na obrázku 6.2.

## 6 MĚŘENÍ FREKVENČNÍ ODEZVY KOMUNIKAČNÍ LED DIODY

Z výsledků je zřejmé, že pro proud 200 mA dosahuje šířka pásma stejné LED diody skoro 9 MHz. Tímto měřením jsem ověřil správnost výzkumu a zjistil jsem, že malý propustný proud u mé zadané komunikační LED diody je omezující pro vyšší přenosové rychlosti. Díky zvýšení propustného proudu z 105 mA na 200 mA jsem dosáhl o skoro 2 MHz větší šířku pásma u zadané komunikační LED diody.



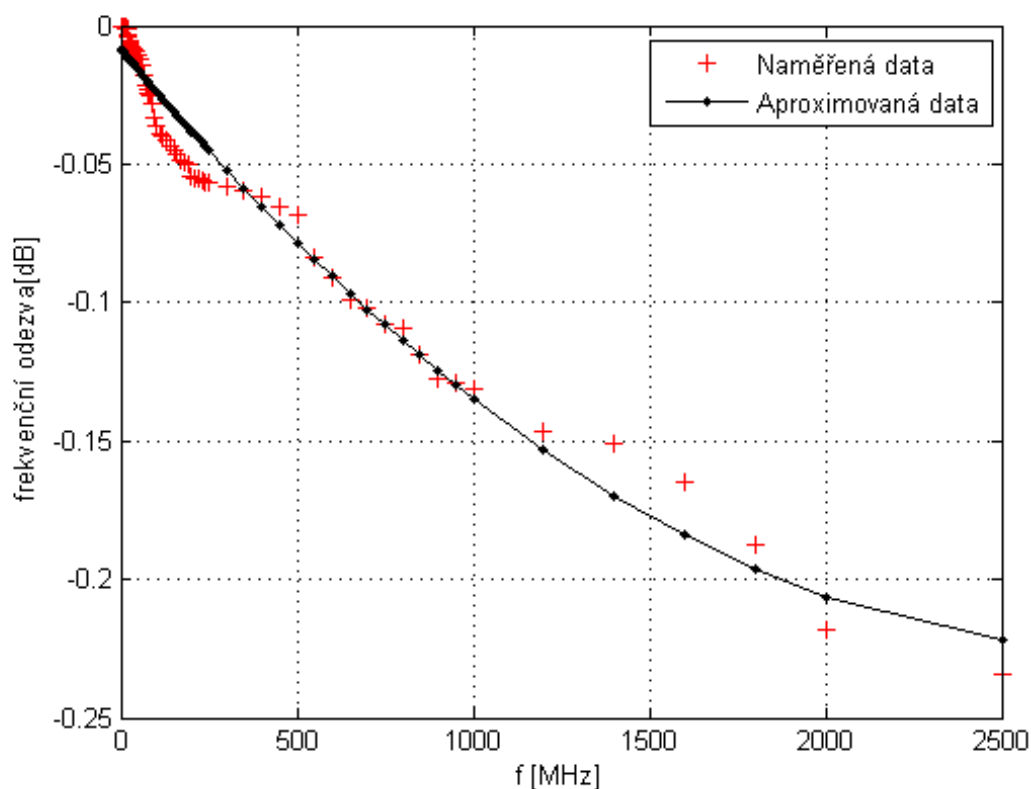
Obrázek 6.2: Změřená frekvenční odezva komunikační LED diody

### 6.1 Bias-Tee

Bias-Tee jsou užitečné pro vložení stejnosměrného napětí na testované zařízení a tím nastavit DC offset. Může být použito například pro testování modulované LED diody, či laserové diody. Při takovýchto zařízeních je potřeba nastavit stejnosměrnou složku pro pracovní bod a na to se naváže střídavý signál (modulace). Koncepčně, je bias-tee jen spojený kondenzátor a induktor. U reálných prvků je největším omezením induktor, zejména jeho vlastní rezonance. Pokud má bias-tee fungovat jen v úzkém pásmu frekvencí, řešením je opravdu jednoduchá LC síť. Ale pro širokopásmové aplikace jsou řešení mnohem složitější, která se používají pro měřicí a testovací účely.

## 6 MĚŘENÍ FREKVENČNÍ ODEZVY KOMUNIKAČNÍ LED DIODY

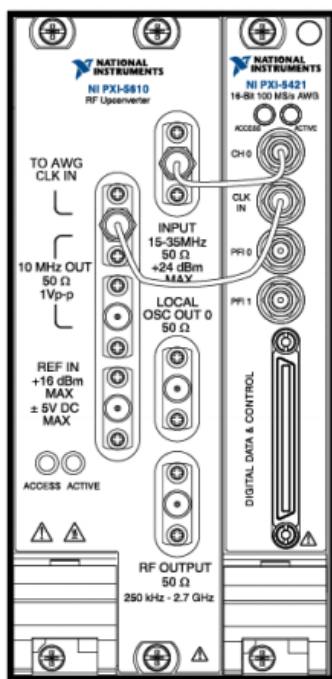
Pro věrohodnost měření, jsem změřil frekvenční odezvu obvodu bias-tee který jsem využíval. Jeho označení je zx85-12g-s+ od firmy Mini-Circuits. Je to širokopásmové profesionální zařízení, které pracuje v oblasti od 200 kHz až do 12 GHz. Stejnosměrnou složku zvládá 25 V a 400 mA. Měření jsem uskutečnil na stejných přístrojích, jako měření frekvenční odezvy komunikační LED diody. Na obrázku 6.3 je vidět graf frekvenční odezvy tohoto zařízení. Z grafu je jasné, že zařízení bias-tee neovlivňuje frekvenční odezvu komunikační LED diody a ani měření modulací.



Obrázek 6.3: Změřená frekvenční odezva obvodu zx85-12g-s+

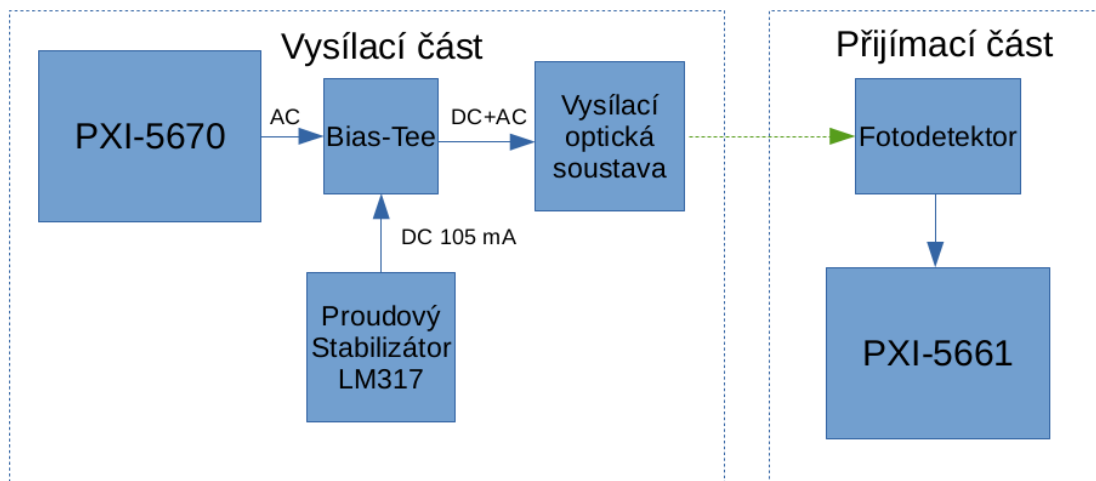
### 7 Měření Modulací

Po změření frekvenční odezvy a určení šířky pásma LED diody jsem otestoval modulace pro systém s Bias-Tee, bez jakékoliv zlepšující elektroniky. Pro měření jsem využil systém labview od NATIONAL INSTRUMENT a jejich vektor signálový generátor NI PXI 5670. Tento generátor signálu se skládá ze dvou modulů. První z nich je upconverter PXI-5610 a druhý generátor libovolného průběhu PXI-5421. Zapojení obou modulů do generátoru signálu, je na obrázku 7.1. Pro softwarovou část jsem využil knihovnu Modulation Toolkit. Tato knihovna zvládá generování známých modulací podle parametrů zadaných uživatelem. Na detekční straně nabídne standardní typy vizualizace výsledků měření, jako například konstelační diagram. Dále nabídne analýzu modulace, ve formě MER a EVM.[23] Další informace ohledně virtuální instrumentace a využití NI PXI jsem čerpal z těchto zdrojů [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31]



**Obrázek 7.1:** Zapojení NI PXI 5670 - vektor signálového generátoru z dvou modulů NI PXI-5610 a NI PXI-5421 [23]

Pracoviště bylo zapojeno podle schématu na obrázku 7.2. Výstup z generátoru byl připojen přes Bias-Tee společně se stejnosměrnou složkou pro nastavení pracovního bodu LED diody. Z Bias-Tee byl připojen signál již posunutý o stejnosměrnou složku na komunikační LED diodu LL-HP60MPGE přes výkonový rezistor o hodnotě 56  $\Omega$ . Detekční strana byla tvořena fotodetektozem PDA10A-EC. Z detektoru byl signál přiveden na analyzátor NI PXI-5661.



Obrázek 7.2: Blokové schéma zapojení pro měření modulací

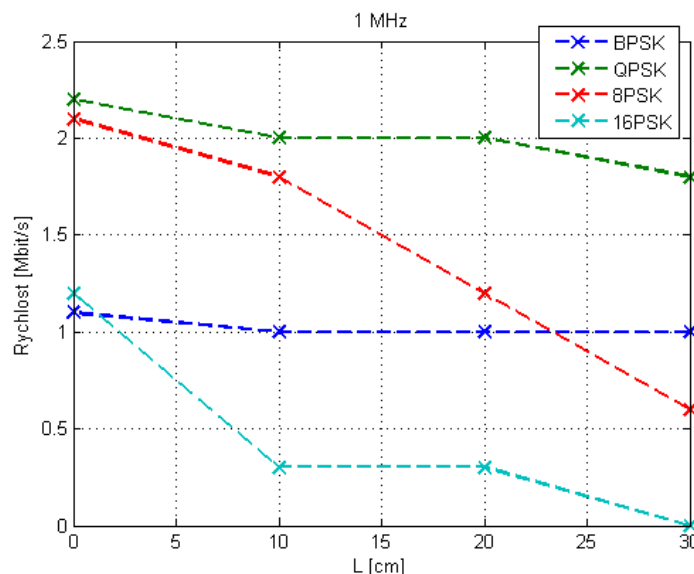
### 7.1 Měření PSK modulační na kompletním systému

Prvním měřením jsem testoval vícecestavové modulační PSK a vliv nosné frekvence a vzdálenosti přijímače na přenosové rychlosti. PSK modulační jsem si zvolil pro jejich odolnost vůči okolního rušení. Dále jsem si zvolil čtyři nosné frekvence 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz a 15 MHz. Dále jsem otestoval vzdálenosti, které dokáže modulační dosáhnout. Jelikož ve vysílací optické soustavě se nachází optické prvky, které snižují propuštěný optický výkon, dosáhla modulační velmi malých vzdáleností. Proto jsem si určil měřit modulační z bezprostřední blízkosti, dále 10 cm od vysílací optické soustavy, 20 cm a nakonec 30 cm. Pro každou vzdálenost a modulační a frekvenci jsem zaznamenal maximální symbolovou rychlost, kterou jsem následně přepočítal na přenosovou rychlost podle druhu modulační. Výsledné naměřené hodnoty jsou v tabulce A.1. Hranici přenosové rychlosti jsem vyhodnocoval z vektorového diagramu modulační zobrazeného na detekční straně. Po nerozeznání jednotlivých stavů na vektorovém diagramu jsem hodnotil, že systém nedokáže komunikovat.

Naměřené přenosové rychlosti jsem vykreslil do grafů pro jednotlivé nosné frekvence. Tím jsem chtěl docílit grafického srovnání přenosových rychlostí jednotlivých PSK modulační v závislosti na vzdálenosti. Graf pro nosnou vlnu 1 MHz je na 7.3. Pro nosnou vlnu 5 MHz je vyobrazen graf s rychlosti přenosu na obrázku 7.4. Na obrázku 7.5 je zobrazen graf přenosových rychlostí pro nosnou vlnu 10 MHz. Jako poslední je na vykreslen graf přenosových rychlostí pro nosnou vlnu 15 MHz na obrázku 7.6.

Pro nosnou vlnu 1 MHz dosáhla modulační QPSK nejvyšší přenosové rychlosti, a to 2,2 Mbit/s v bezprostřední blízkosti u optického vysílače. Těsně za ní dosáhla přenosové rychlosti 2,1 Mbit/s modulační 8PSK. Hodně podobné výsledky dosáhli modulační 16PSK a BPSK s 1,2 Mbit/s pro modulační 16PSK a 1,1 Mbit/s pro BPSK. Ve vzdálenosti 10 cm se již začali projevovat rozdíly. Zatímco modulační QPSK a 8PSK své pořadí zachovali, kdy QPSK modulační zvládla přenosovou rychlost 2 Mbit/s a modulační 8PSK 1,8 Mbit/s,





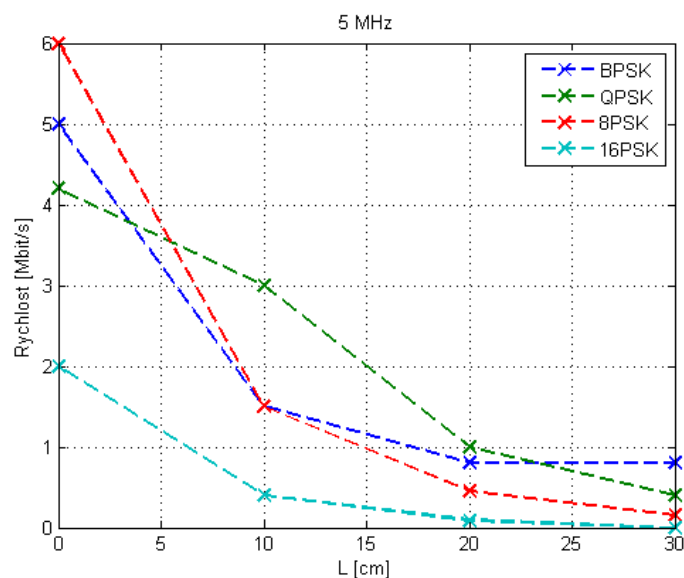
**Obrázek 7.3:** Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 1 MHz na kompletním optickém vysílači

u modulace 16PSK byl velký rozdíl. BPSK modulace klesla na 1 Mbit/s a na pouhých 400 kbit/s klesla modulace 16PSK. Stále s nejvyšší přenosovou rychlostí dosáhla modulace QPSK 2 Mbit/s ve vzdálenosti 20 cm od optického vysílače. Modulace 8PSK v této vzdálenosti zvládla maximální přenosové rychlosti 1,2 Mbit/s. BPSK modulace držela svou přenosovou rychlost stabilní na 1 Mbit/s. Se stejnými 400 kbit/s dosáhla v této vzdálenosti modulace 16PSK. Ve vzdálenosti 30 cm od optického vysílače si modulace BPSK stále zachovala maximální přenosovou rychlost 1 Mbit/s, zatímco u modulace 8PSK již klesla na 600 kbit/s. Modulace QPSK stále dosahovala největší maximální přenosové rychlosti a to 1,8 Mbit/s. U modulace 16PSK již nešlo komunikovat vůbec.

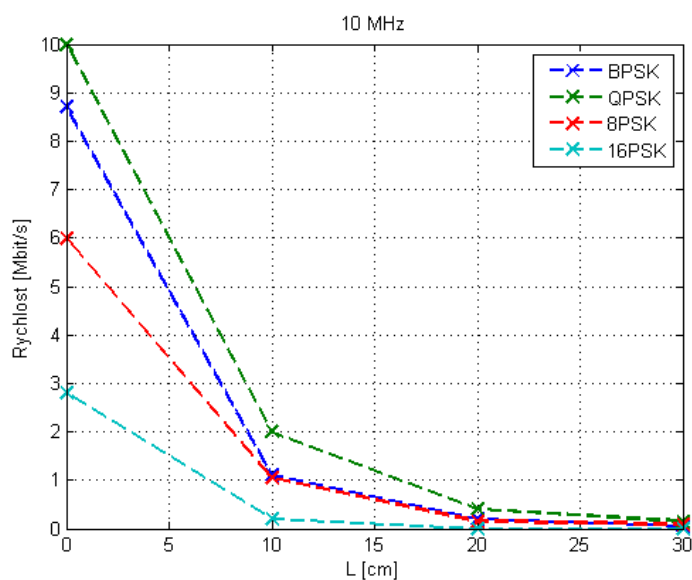
Graf na obrázku 7.4 znázorňuje závislosti přenosových rychlostí jednotlivých PSK modulací na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz. V bezprostřední blízkosti u optického vysílače dosáhla modulace 8PSK nejvyšší přenosové rychlosti 6 Mbit/s, BPSK 5 Mbit/s, QPSK 4,2 Mbit/s a 16PSK pouze 2 Mbit/s. Ve vzdálenosti 10 cm od optického vysílače měla modulace QPSK nejvyšší přenosové rychlosti 3 Mbit/s. Modulace BPSK a 8PSK měly stejnou maximální přenosovou rychlost a to 1,5 Mbit/s. Jako nejhorší modulace zde vyšla 16PSK s pouhými 400 kbit/s. Když se optický fotodetektor nacházel ve vzdálenosti 20 cm od optického vysílače, dosáhli modulace maximální přenosové rychlosti 1 Mbit/s a to s modulací QPSK. Modulace BPSK dosáhla maximální přenosové rychlosti 800 kbit/s, 8PSK 450 kbit/s a modulace 16PSK pouze 120 kbit/s. BPSK modulace měla dosáhnout nejvyšší přenosové rychlosti ve vzdálenosti 30 cm, oproti ostatním modulacím. Udržela se na 800 kbit/s, zatímco modulace QPSK klesla na pouhých 400 kbit/s, modulace 8PSK na 150 kbit/s. Modulace 16PSK již nebyla schopna modulaci zachytit na takovou vzdálenost.

Pro větší frekvence nosné vlny byli výsledky mnohem horší. Jelikož s rostoucí frek-

## 7 MĚŘENÍ MODULACÍ

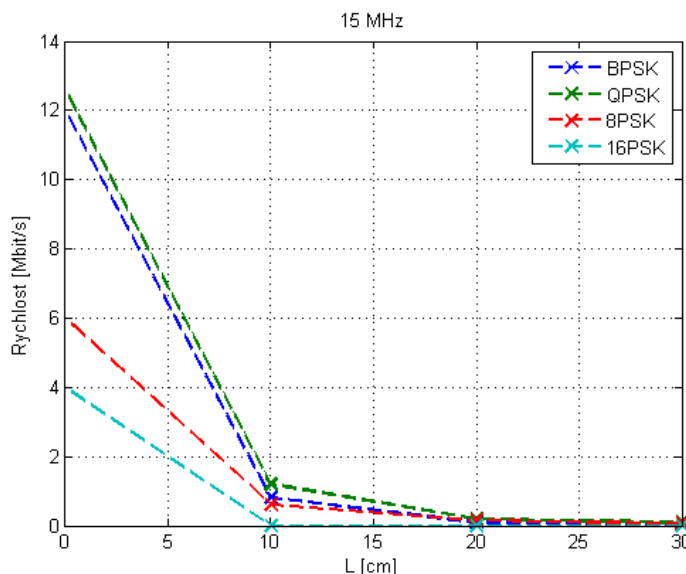


Obrázek 7.4: Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 5 MHz na kompletním optickém vysílači



Obrázek 7.5: Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 10 MHz na kompletním optickém vysílači

vencí nosné vlny se snižuje rozkmit modulace na komunikační LED diodě, jak bylo zjištěno měřením frekvenční odezvy LED diody v kapitole 6. fotodetektor byl schopen tento rozkmit optického výkonu zaznamenat v bezprostřední vzdálenosti, ale s rostoucí



**Obrázek 7.6:** Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 15 MHz na kompletním optickém vysílači

vzdáleností již tuto vlastnost ztrácel.

Jak je z grafů patrné, Nosná frekvence o menších hodnot dosahuje lepší stability přenosové rychlosti v závislosti na přenášené vzdálenosti, což je způsobeno zmenšením rozkmitu modulační pro větší nosné frekvence. Ze všech nosných frekvencí vždy vyšla nejvýhodnější čtyř stavová modulační QPSK, zatímco Nejjednodušší BPSK modulační vykazovala nejlepší stability. Pro toto měření s kompletní vysílací optickou soustavou, kdy difuzor hodně světelného výkonu rozptyluje, vyšla nejlépe modulační QPSK pro nosnou frekvenci 1 MHz. V tomto případě se systém dá použít pro komunikaci na velmi krátké vzdálenosti, kdy v praxi je to nepoužitelné.

Další vlastnosti, které jsem proměřil, je závislost vzdálenosti detektoru na modulační chybovosti MER a EVM. Měření probíhalo s konstantní symbolovou rychlostí 100 kHz. Ve vzdálenostech 0 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm a 40 cm jsem pro každou nosnou frekvenci 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz a 15 MHz provedl měření MER a EVM. Naměřené hodnoty jsou v A.2 v Příloze A, vzhledem k rozměrnosti tabulky.

Výsledné grafy jsou v příloze A. Na obrázcích A.1, A.2, A.3 a A.4 jsou výsledky z závislosti EVM na vzdálenosti vzhledem k nosné frekvenci pro jednotlivé modulační MPSK. Grafy závislosti MER na vzdálenosti vzhledem k nosné frekvenci pro jednotlivé modulační jsou na obrázcích A.5, A.6, A.7 a A.8. Z grafů je vidět, že hodnota MER i EVM se mění dosti podobně pro jednotlivé MPSK modulační.

Celkový výsledek z měření PSK modulací pro kompletní optický vysílací systém nebyl moc uspokojivý. Dosažené vzdálenosti jsou v praxi nepoužitelné. Omezující fakt byl malý vysílací výkon zelené LED diody. Dalším velmi omezujícím prvkem v optickém vysílacím systému byl difuzor, který hodně redukoval vysílaný optický výkon na

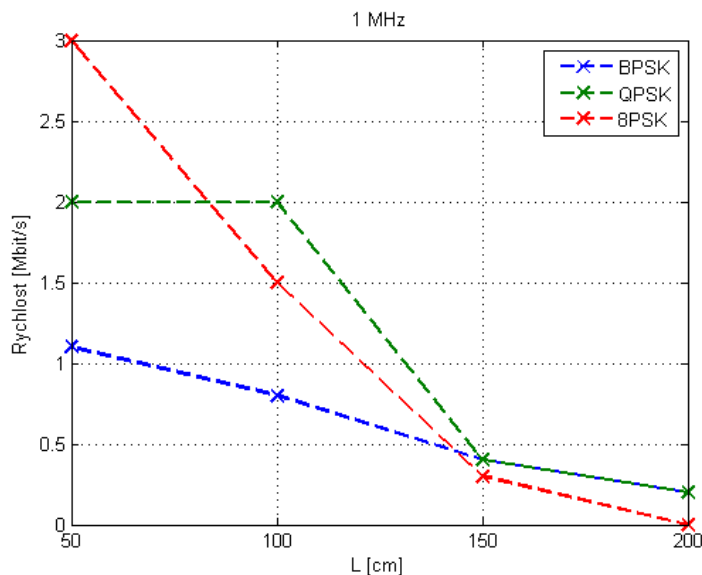
plochu. Rychlosti přenosu byli velice omezeny malým propustným proudem LED diody. Tento fakt jsem ověřil v předchozí podkapitole 6, kdy jsem pro větší propustný proud komunikační LED diody dosáhl větší šířky pásma.

### 7.2 Měření PSK modulace na komunikační LED diodě

Pro další otestování komunikačních parametrů jsem se rozhodl otestovat modulace jen na komunikační LED diodě bez optických prvků. Měření probíhalo stejně jak u předešlého měření. Zapojení bylo podle obrázku 7.2, jen s tím rozdílem, že místo kompletní vysílací optické soustavy, byla jen komunikační LED dioda. Tím jsem odstranil rozdělení optického výkonu komunikační LED diody přes polopropustné zrcadlo a velké ztráty optického výkonu na difuzoru. Pro zlepšení příjmu optického výkonu na velmi malý čip fotodetektoru, jsem použil plankonvexní spojnou čočku, díky které jsem zaměřil optický výkon z větší plochy na čip fotodetektoru.

Prvotně jsem otestoval přibližnou možnou vzdálenost pro přenos modulace, abych určil vzdálenosti pro měření. Díky zlepšení výsledků odstraněním optického difuzoru a polopropustného zrcadla a díky čočce na fotodetektoru, jsem měření provedl ve vzdálenostech 50 cm, 100 cm, 150 cm a 200 cm. Z zjištění minulého měření, že vyšší nosné frekvence dosahují horších výsledků, jsem měření provedl na nosných signálech o frekvencích 1 MHz, 3 MHz, 5 MHz a 7 MHz.

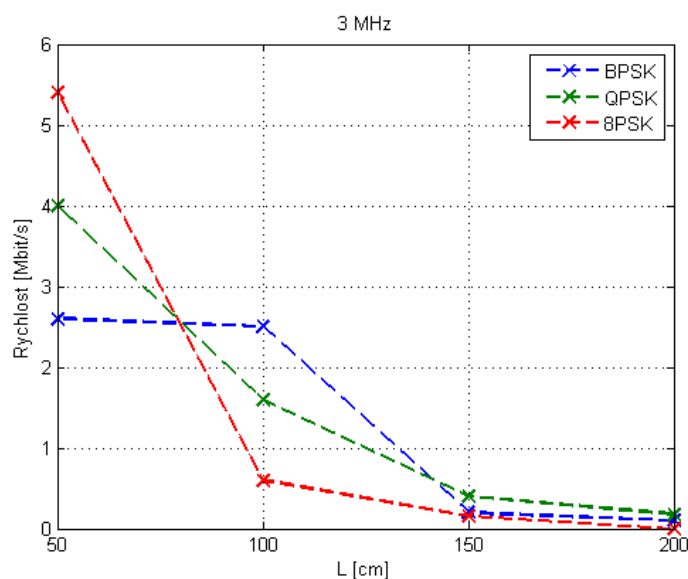
Výsledky měření dosažených přenosových rychlostí pro jednotlivé frekvence a vzdálenosti jsou uvedeny v grafech na obrázku 7.7, 7.8, 7.9 a 7.10.



**Obrázek 7.7:** Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 1 MHz na komunikační LED diodě

## 7 MĚŘENÍ MODULACÍ

Vzdálenosti na které je ještě možno komunikovat pomocí komunikační LED diody, byli vyšší, než u měření modulací na kompletním komunikačním systému. Pro vzdálenost 50 cm dosáhla nejlepších výsledků modulace 8PSK a to 3 Mbit/s. Na vzdálenost jednoho metru pro frekvenci 1 MHz nosného signálu PSK modulace, jsem dosáhl nejlepších výsledků s modulací QPSK, kdy přenosová rychlost dosahovala 2 Mbit/s. Pro vzdálenost 1,5 m dosáhli modulace podobných výsledků, kdy BPSK a QPSK byli 400 kbit/s, zatímco pro 8PSK jen 300 kbit/s. Pro vzdálenost 2 m byla přenosová rychlost pro BPSK pouze 200 kbit/s, pro QPSK 100 kbit/s a pro 8PSK již nebylo možno komunikovat vůbec.

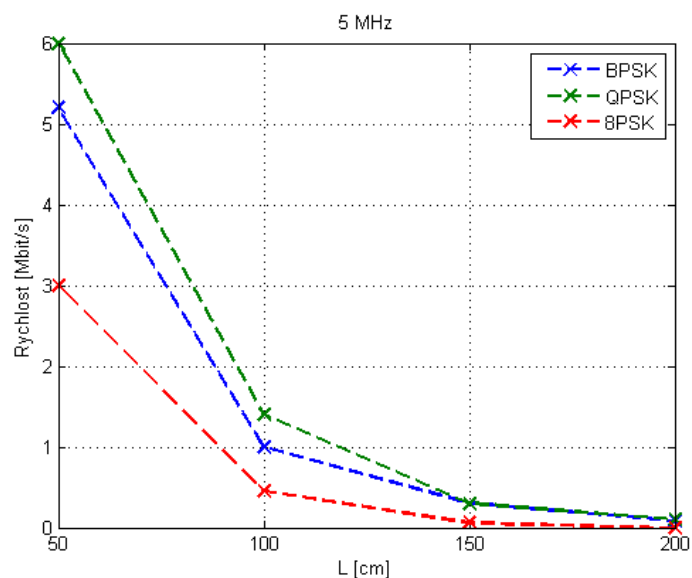


**Obrázek 7.8:** Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 3 MHz na komunikační LED diodě

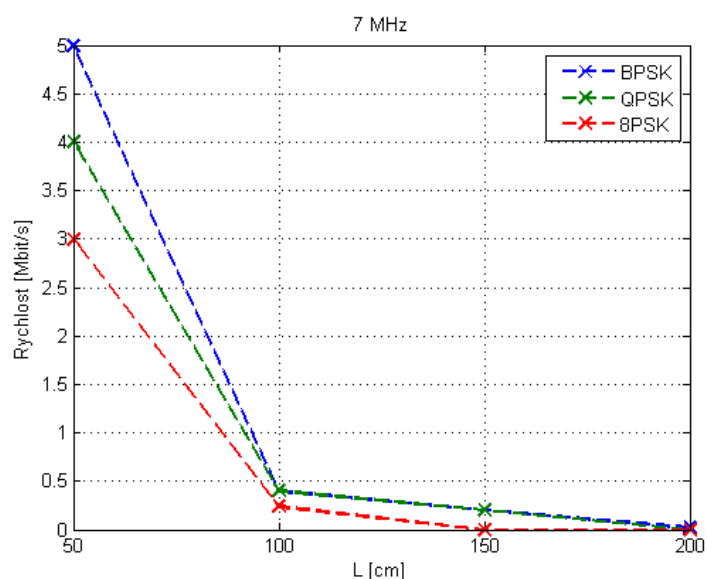
Pro nosnou vlnu o frekvenci 3 MHz, dosáhla největších přenosových rychlostí modulace 8PSK na vzdálenost 50 cm. V této vzdálenosti dosáhla přenosové rychlosti 5,4 Mbit/s, zatímco modulace QPSK dosáhla přenosové rychlosti 4 Mbit/s a modulace BPSK jen 2,6 Mbit/s. Pro vzdálenost 100 cm jsem změřil maximální přenosovou rychlost 2,5 Mbit/s s pomocí modulace BPSK. V této vzdálenosti modulace QPSK dosahovala přenosových rychlostí 1,6 Mbit/s a 8PSK jen 600 kbit/s. Ve vzdálenosti 150 cm byli přenosové rychlosti o mnoho horší a to jen 400 kbit/s pro modulaci QPSK, 200 kbit/s pro modulaci BPSK a 150 kbit/s pro modulaci 8PSK. Ve vzdálenosti 200 cm již modulace 8PSK nebyla schopna přenášet informace a QPSK dosáhla jen 180 kbit/s a BPSK pouze 100 kbit/s.

U nosné vlny modulace o frekvenci 5 MHz jsem změřil nejvyšší možnou rychlost přenosu ve vzdálenosti 50 cm pro modulaci QPSK, kdy přenosová rychlost dosahovala k 6 Mbit/s. S rychlostí přenosu 5,2 Mbit/s vyšla modulace BPSK pro stejnou vzdálenost 50 cm. Zde se již ukazuje fakt, že s rostoucí frekvencí nosné vlny modulace stoupá náchylnost více stavových modulací na možnou překlenutelnou vzdálenost. Modulace 8PSK pro vzdálenost 50 cm zde dosahuje jen 3 Mbit/s. Toto pořadí modulací se drží stejně

## 7 MĚŘENÍ MODULACÍ



Obrázek 7.9: Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 5 MHz na komunikační LED diodě



Obrázek 7.10: Srovnání přenosové rychlosti PSK modulací pro nosnou vlnu 7 MHz na komunikační LED diodě

i pro vzdálenost 100 cm, kdy QPSK modulace dosáhla maximální přenosové rychlosti 1,4 Mbit/s, BPSK modulace 1 Mbit/s a 8PSK jen 450 kbit/s. Ve vzdálenosti 150 cm modulace QPSK a BPSK dosáhli stejné přenosové rychlosti 300 kbit/s, zatímco modulace 8PSK jen 60 kbit/s. Ve vzdálenosti 200 cm vyšla přenosová rychlost modulace QPSK stále

nejlépe s 100 kbit/s. BPSK dosáhla 80 kbit/s a 8PSK modulace nebyla na tuto vzdálenost již komunikovat vůbec.

Pro nejvyšší nosnou frekvenci 7 MHz v tomto měření, vyšla jako nejlepší modulace BPSK, která na vzdálenost 50 cm dosáhla přenosové rychlosti 5 Mbit/s. Modulace QPSK 4 Mbit/s a 8PSK modulace jen 3 Mbit/s. Na této frekvenci nosného signálu je jasně vidět, jak více stavové modulace dosahují horších výsledků. Pro vzdálenost 100 cm vyšla přenosová rychlost modulace BPSK jen 400 kbit/s, stejně tak u QPSK a u 8PSK 240 kbit/s. Pro vzdálenost 150 cm modulace 8PSK již nebyla schopna komunikovat a modulace BPSK a QPSK dosáhli maximálně 200 kbit/s. Ve vzdálenosti 200 cm již byla schopna přenášet modulace jen BPSK a to maximální rychlostí 20 kbit/s.

Vzhledem k největším přenosovým rychlostem vyšla modulace QPSK pro nosnou frekvenci 5 MHz nejlépe, ve vzdálenosti 50 cm, kdy dosáhla maximálně 6 Mbit/s. Pokud však budu brát v úvahu použitelnosti systému v praxi, tak ve vzdálenosti 100 cm vyšla nejlépe modulace BPSK s přenosovou rychlostí 2,5 Mbit/s. Modulace QPSK pro nosnou vlnu 1 MHz a 3 MHz vyšla nejlépe s 400 kbit/s, stejně tak BPSK pro nosnou 1 MHz. Ve vzdálenosti 200 cm na tom byla stejně BPSK modulace a QPSK na nosné 1 MHz, kdy oboje dosáhli 200 kbit/s. Všechny naměřené hodnoty pro toto měření, jsou v tabulce A.3.

Dalším měřením jsem otestoval změnu EVM a MER na modulaci, nosné vlně a vzdálenosti. Měření jsem prováděl stejně, jako pro měření přenosových rychlostí na komunikační LED diodě, jen s rozdílem, že jsem nechal nastavenou konstantní symbolovou rychlost 100 kHz. Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulce A.4 v příloze A. Výsledky jsou vykresleny v grafech v příloze A, kdy změna EVM je na grafu A.9 pro nosnou vlnu 1 MHz. Pro nosnou vlnu 3 MHz je graf změn EVM na obrázku A.10. Na obrázku A.11 je graf změn EVM pro nosnou vlnu 5 MHz a na obrázku A.12 je graf změn EVM pro nosnou vlnu 7 MHz. Stejně tak jsou zobrazeny v grafech změny MER a to na obrázcích A.13, A.14, A.15 a A.16.

## 8 Závěr

Z nastudovaných materiálů v oblasti VLC je zřejmé, že výzkum směřuje na pokročilé digitální modulace, jako je QAM společně s OFDM. Jak kontrolovat jas zdroje světla a zároveň přenášet data, je nespočet možností. Někde nasadili signál OFDM na PWM signál, jinde zase upravili OFDM modulaci na U-OFDM a jiné. Dobrou variantou jsou i pokročilé pulzní modulace, které jsem uvedl v kapitole 3.4, které můžou relativně držet optický výkon vysílače na konstantní hranici nezávisle na vysílaných datech. Tyto modulace však potřebují větší přenosové pásmo, protože se vysílá s datovými bity i redundantní bity. Stejně tak fungují linkové kódy Manchester a 4B6B, které jsou popsány v kapitole 4.1.

Největším problémem je malá šířka pásma výkonových LED diod. Nejhůře na tom jsou bílé výkonové LED diody s vrstvou luminoforu, jelikož luminofor má velké zpoždění a tím dost omezuje maximální přenosovou rychlost. Toto se snaží řešit mnoho výzkumů pomocí odfiltrování luminoforu na detekční straně a tím detekovat jen modrou rychlou složku světla. Další výzkumy se zabývají zvětšením šířky pásma pomocí ekvalizace. Jde o to, že pomocí správného návrhu filtrů a zesilovačů, se křivka frekvenční odezvy LED diody natáhne do vyšších frekvencí. Jednoduše řečeno, nižší frekvence se utlumí a vyšší frekvence se zesílí. Mnou proměřovaný optický vysílací systém se tyto omezení snaží obejít již na vysílací straně. Vysílací LED dioda o úzké spektrální charakteristice bez pomalého luminoforu a samozřejmě menšího výkonu.

Problém, který jsem potřeboval vyřešit byl, jak spínat vysoké výkony, abych byl schopný modulovat komunikační LED diodu. Tento problém jsem obešel pomocí obvodu bias-tee, který je popsán v kapitole 6.1. Modulátory navržené minulé roky se snažili řídit signál, pro řízení světelného vysílače, spínat pomocí tranzistorů. Tím se ochudili o již už tak malou šířku pásma LED diod. Pro další výzkum je určitě nezbytné využít obvodu bias-tee a vyhnout se spínání velkých výkonů.

Z měření komunikačních parametrů optického vysílacího systému plyne, že nedosahuje velkých přenosových rychlostí. Díky difuzoru a polopropustného zrcadla je optický výkon komunikační LED diody velice zredukován a rozptýlen, čímž se zhorší komunikační parametry. Díky měření na kompletním optickém vysílači jsem zjistil, že optickou soustavu vysílače je potřeba upravit, nejlépe odstranit difuzor. K dalšímu zjištění jsem dospěl měření komunikačních parametrů na komunikační LED diodě bez optického systému. Výkon komunikační LED diody je dost malý a omezuje tak dosah modulovaného signálu z komunikační LED diody. Pro využití v praxi je potřeba dosáhnout větších vzdáleností, ve kterých je možnost detekovat komunikaci z optického vysílače.

Dalším studiem výzkumů v oblasti VLC a následným prověřením, jsem dospěl k závěru, že omezujícím faktorem na navrženém optickém vysílači je malý propustný proud komunikační LED diody. Tato LED dioda zvládá až 350 mA propustného proudu a daných 105 mA, na které je tento systém navržen, je málo. Díky tak malému propustnému proudu se snižuje optický výkon, jak jsem již psal, ale také šířka pásma. Z měření modulací je taky zřejmé, že kvůli klesajícímu rozkmitu na vyšších frekvencích, jsou komunikační parametry na vyšších nosných frekvencích horší v závislosti na vzdálenosti. Více stavové modulace vykazovali horší stabilitu v závislosti na vzdálenosti.



Pro další postup výzkumu navrhuji upravit optický vysílač, a to ve směru zmenšení ztrát optického výkonu na optické soustavě. Doporučuji odstranit difuzor a zaměřit se na lepší výběr komunikační LED diody, která bude výkonnější a hlavně, aby její pracovní bod byl v co největším maximu její PI charakteristiky. Tímto docílit větší šířky pásma a optického výkonu, což bude mít za následek zvětšení dosahu komunikace. Dalším postupem by mohl být návrh ekvalizéru pro vhodnou komunikační LED diodu, čímž by se dosáhlo větší šířky pásma. Stejně tak se zaměřit na pokročilejší modulační techniky.

## 9 Literatura

- [1] IEEE Std 802.15.7. *Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light*. New York: IEEE Computer Society, 2011. ISBN 978-0-7381-6665-0.
- [2] Chung Ghiu Lee. *Visible Light Communication, Advanced Trends in Wireless Communications*, Dr. Mutamed Khatib (Ed.), ISBN: 978-953-307-183-1, InTech 2011, Available from: [http : //www.intechopen.com/books/advanced – trends – in – wireless – communications/visible – light – communication](http://www.intechopen.com/books/advanced-trends-in-wireless-communications/visible-light-communication)
- [3] *Optical Wireless Communications: System and Channel Modeling with MATLAB*. 2013 [cit. 2015-04-01]. ISBN 978-1-4398-5235-4.
- [4] PEI, Yanrong, Shaoxin ZHU, Hua YANG, Lixia ZHAO, Xiaoyan YI, Junxi Junxi WANG a Jinmin LI. *LED Modulation Characteristics in a Visible-Light Communication System*. *Optics and Photonics Journal* [online]. 2013, vol. 03, issue 02, s. 139-142 [cit. 2015-04-18]. DOI: 10.4236/opj.2013.32b034.
- [5] H.L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. J. Oh a E. T. Won, *100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED* *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 21, No.15, Srpen 2009.
- [6] J. Vučić, C. Kottke, S. Nerreter, K.-D. Langer and W. Waleski, *513 Mbit/s Visible Light Communication Link Based on DMT-Modulation of a White LED*, *Journal of Light Technology*, Vol. 28, No. 24, 2010.
- [7] J. Vučić, C. Kottke, K. Habel a K.-D. Langer, *803 Mbit/s Visible Light WDM Link based on DMT Modulation of a single RGB LED Luminary*, *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2011 and the National Fiber Optic Engineers Conference, Conference Publications*, Březen 2011, pp.1-3.
- [8] LI, Honglei Li Honglei, Xiongbin Chen Xiongbin CHEN, Junqing Guo Junqing GUO, Danying Tang Danying TANG, Beiju Huang Beiju HUANG a Hongda Chen Hongda CHEN. *200 Mb/s visible optical wireless transmission based on NRZ–OOK modulation of phosphorescent white LED and a pre-emphasis circuit*. *Chinese Optics Letters* [online]. 2014, vol. 12, issue 10, s. 100604-100607 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.3788/col201412.100604.
- [9] LI, Honglei, Xiongbin CHEN, Junqing GUO a Hongda CHEN. *A 550 Mbit/s real-time visible light communication system based on phosphorescent white light LED for practical high-speed low-complexity application*. *Optics Express* [online]. 2014, vol. 22, issue 22 [cit. 2015-04-13]. DOI: 10.1364/oe.22.027203.
- [10] Vitásek, Jan. *Optické atmosférické komunikace* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014.
- [11] HANUS, Stanislav. *Bezdrátové a mobilní komunikace.*, 1. vyd. Brno: VUT, 2001, 134 s. ISBN 80-214-1833-8.

- [12] BĚLOHLÁVEK, Jiří. *NÁVRH TYPU MODULACE PRO PROSTŘEDÍ S RUŠENÍM*. Brno, 2009. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [13] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 653 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [14] Modulační parametry. In: *Horevaj* [online]. 2012 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: [http : //horevaj.com/horevaj/K4files/K4s8.pdf](http://horevaj.com/horevaj/K4files/K4s8.pdf)
- [15] Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM). *National Instruments* [online]. 2014 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: [http : //www.ni.com/white – paper/3652/en/](http://www.ni.com/white-paper/3652/en/)
- [16] Error Vector Magnitude (EVM). *MathWorks* [online]. 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: [http : //www.mathworks.com/help/comm/ug/error – vector – magnitude – evm.html](http://www.mathworks.com/help/comm/ug/error-vector-magnitude-evm.html)
- [17] CO-SPONSORED BY HENAN POLYTECHNIC UNIVERSITY, China; . *Proceedings: 14 - 15 Aug. 2010, Jiaozuo, China*. Oulu: Academy Publ, 2010. ISBN 9789525726107.
- [18] YANG LIU a ZHANG GUO-AN. *OPTOELECTRONICS LETTERS. A new modulation scheme of visible light communication*. 2014, č. 4.
- [19] GHASSEMLOOY, Z. a N.M. ALDIBBIAT. . *Multilevel Digital Pulse Interval Modulation Scheme for Optical Wireless Communications*. Optical Communications research Group, NCRLab, Northumbria University, Newcastle upon Tyne, UK,
- [20] VITÁSEK, Jan. *Výzkum zářivých zdrojů pro současné působení v optických komunikacích a osvětlování*. Ostrava, 2013. Dizertační práce. VŠB-Technická Univerzita Ostrava. Vedoucí práce prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
- [21] Luxeon 5-Watt Star: *Technical Data DS30*. 2002. Dostupné z: [http : //www.roithner – laser.com/datasheets/led\\_single/hexagonal/lxhl5w.pdf](http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_single/hexagonal/lxhl5w.pdf)
- [22] LUCKY LIGHT ELECTRONICS CO. Ltd. *1W Green High Power LED: Technical Data Sheet*. 2009
- [23] MARTINEK, Radek. *GENEROVÁNÍ DIGITÁLNĚ MODULOVANÝCH SIGNÁLŮ S VYUŽITÍM MODULÁRNÍHO SYSTÉMU HARDWAROVÉ PLATFORMY V PODOBĚ PXI VEKTOR SIGNÁLOVÉHO GENERÁTORU A KNIHOVNÍCH FUNKCÍ Z DOPLŇKOVÉ KNIHOVNY MODULATION TOOLKIT*. Ostrava, 2011.
- [24] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. *The Real Implementation of ANFIS Channel Equalizer on the System of Software-Defined Radio*. In *Journal: IETE Journal of Research*. Taylor & Francis, London, UK, 2014, Volume 60, Issue 2, pages 183-193, ISSN 0377-2063 (Print), 0974-780X (Online), DOI:10.1080/03772063.2014.914698.

- [25] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. *The implementation of channel coding into the digital transmission chain consisting of VSG PXI-5670 - VSA PXI-5661*. In Journal: Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Volume 89, Issue 7, 2013, Warszawa, Poland, pp. 64-68, ISSN 0033-2097.
- [26] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan; TOMALA, Karel. *BER Measurement in Software Defined Radio Systems*. In Journal: Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Volume 89, Issue 2B, 2013, Warszawa, Poland, pp. 205-210, ISSN 0033-2097.
- [27] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. *The real implementation of NLMS channel equalizer into the system of software defined radio*. In Journal: *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, Volume 10, Issue 5, December 2012, Pages 330-336, VSB - Technical University of Ostrava and University of Zilina Faculty of Electrical Engineering, ISSN 1336-1376 (Print) ISSN 1804-3119 (Online), MK CR E 20146.
- [28] MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. *Application of synthetic instrumentation that applies the trend of software-based approach for measuring on the field of modern wireless transfer systems*. In *International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDIWC)*. Volume 2, Number 3, Published by The Society of Digital Information and Wireless Communications, Kowloon, Hong Kong, 2012. pp. 208-221, ISSN: 2225-658X.
- [29] AL-WOHAISHI, Mohamed; ZIDEK, Jan; MARTINEK, Radek. *Analysis of M State Digitally Modulated Signals in Communication Systems Based on SDR Concept*. In *Proceedings: The 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications; first issue*. Praha, Czech Republic; IEEE Ukraine & ČVUT Praha, 2011, pp. 171-175, ISBN 978-1-4577-1423-8.
- [30] AL-WOHAISHI, Mohamed; MARTINEK, Radek; ZIDEK, Jan. *Communications in Computer and Information Science, Digital Information Processing and Communications, Part II : In Proceedings of International Conference on Digital Information processing and Communications, ICDIP2011, Ostrava, Czech Republic*. 1st Edition, Volume 189, Part 13. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 2011. Analysis of M-QAM Data Communication System Using 3D Eye Diagram. pp. 337-348. ISBN 978-3-642-22409-6, ISSN 1865-0929, DOI: 10.1007/978-3-642-22410-2.
- [31] MARTINEK, Radek; AL WOHAISHI, Mohamed; ZIDEK, Jan. *Software Based Flexible Measuring Systems for Analysis of Digitally Modulated Systems*. In *Conference Proceedings: The 9th Roedunet International Conference, RoEduNet*. Sibiu, Romania, 24-26 June 2010, pp. 397-402, ISBN 978-1-4244-7335-9, ISSN 2068-1038.

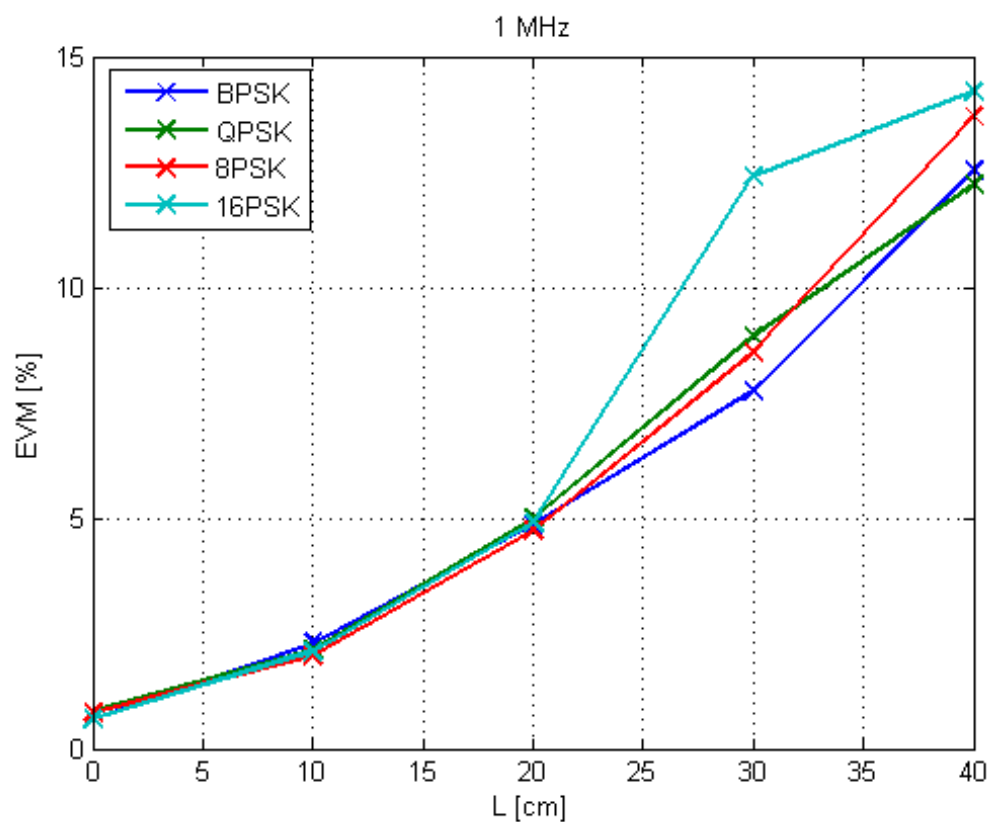
## A GRAFY A MĚŘENÍ

### A Grafy a měření

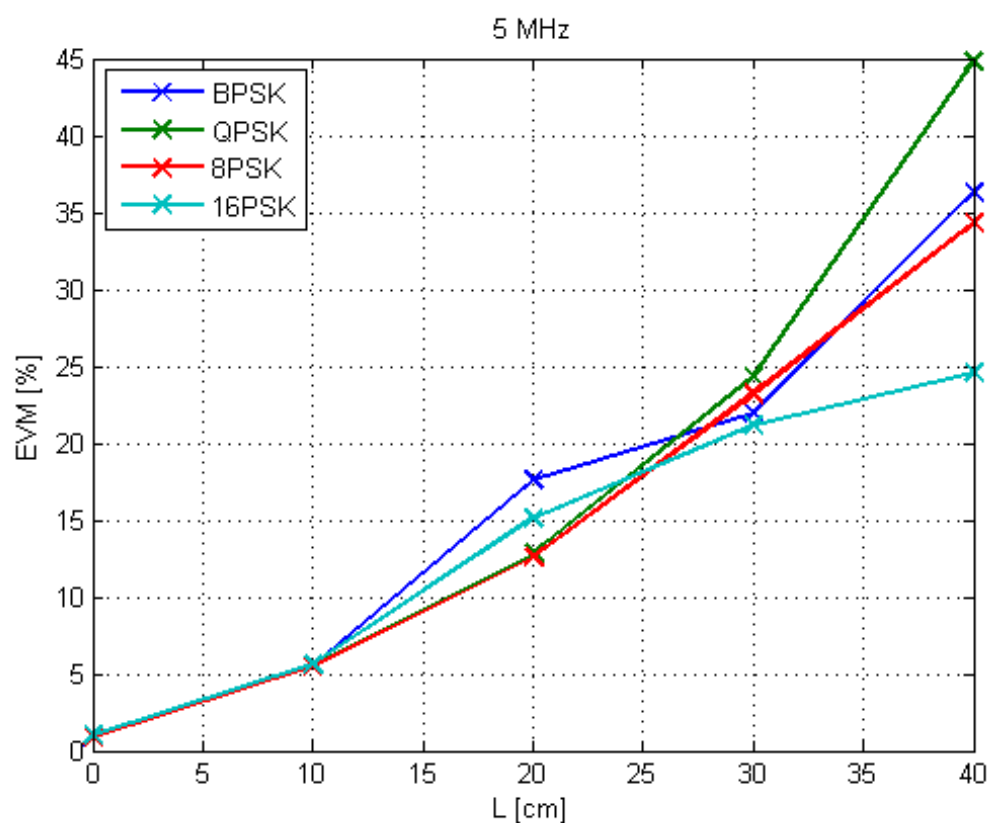
Tabulka A.1: Rychlosti modulací PSK na kompletním optickém vysílači

Modulace	Nosná vlna [MHz]	Vzdálenost [cm]				Vzdálenost [cm]			
		0	10	20	30	0	10	20	30
		Symbolová rychlost [kHz]				Přenosová rychlost [kbit/s]			
BPSK	1	1100	1000	1000	1000	1100	1000	1000	1000
	5	5000	1500	800	200	5000	1500	800	200
	10	8700	1100	200	50	8700	1100	200	50
	15	12000	800	100	40	12000	800	100	40
QPSK	1	1100	1000	1000	900	2200	2000	2000	1800
	5	2100	1500	500	200	4200	3000	1000	400
	10	5000	1000	200	75	10000	2000	400	150
	15	6300	600	100	50	12600	1200	200	100
8PSK	1	700	600	400	200	2100	1800	1200	600
	5	2000	500	150	50	6000	1500	450	150
	10	2000	350	50	30	6000	1050	150	90
	15	2000	200	50	20	6000	600	150	60
16PSK	1	300	100	100	0	1200	400	400	0
	5	500	100	30	0	2000	400	120	0
	10	700	50	0	0	2800	200	0	0
	15	1000	0	0	0	4000	0	0	0

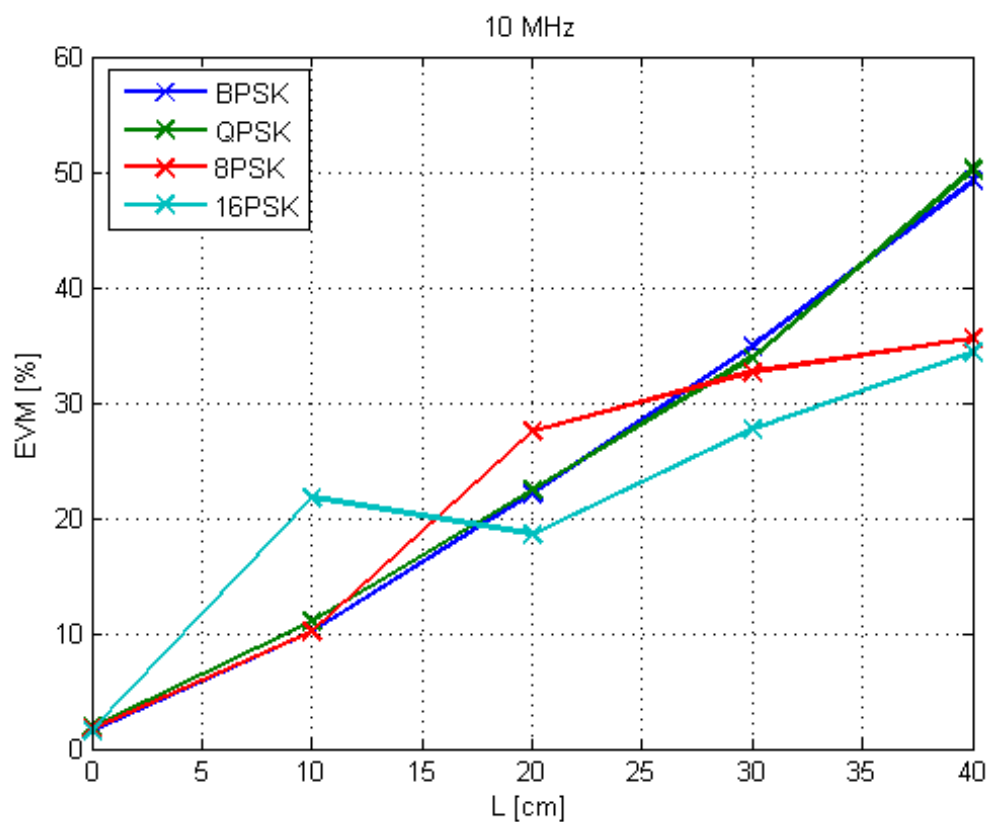
## A GRAFY A MĚŘENÍ



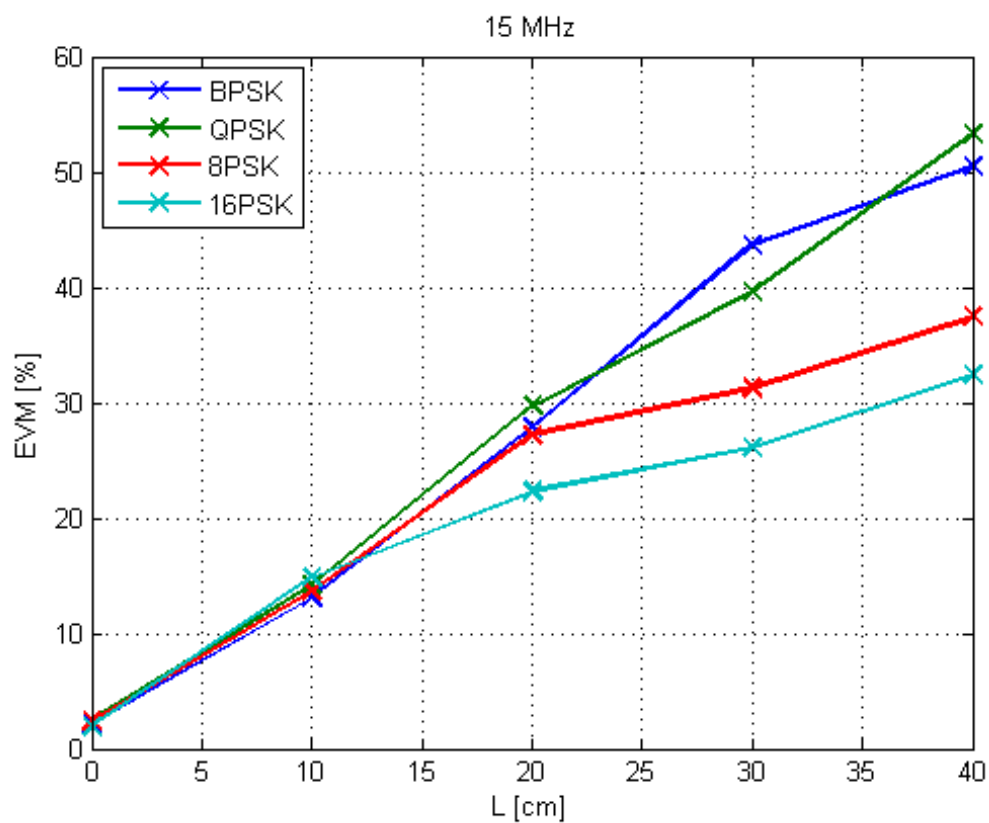
Obrázek A.1: Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na kompletním optickém vysílači



Obrázek A.2: Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na kompletním optickém vysílači

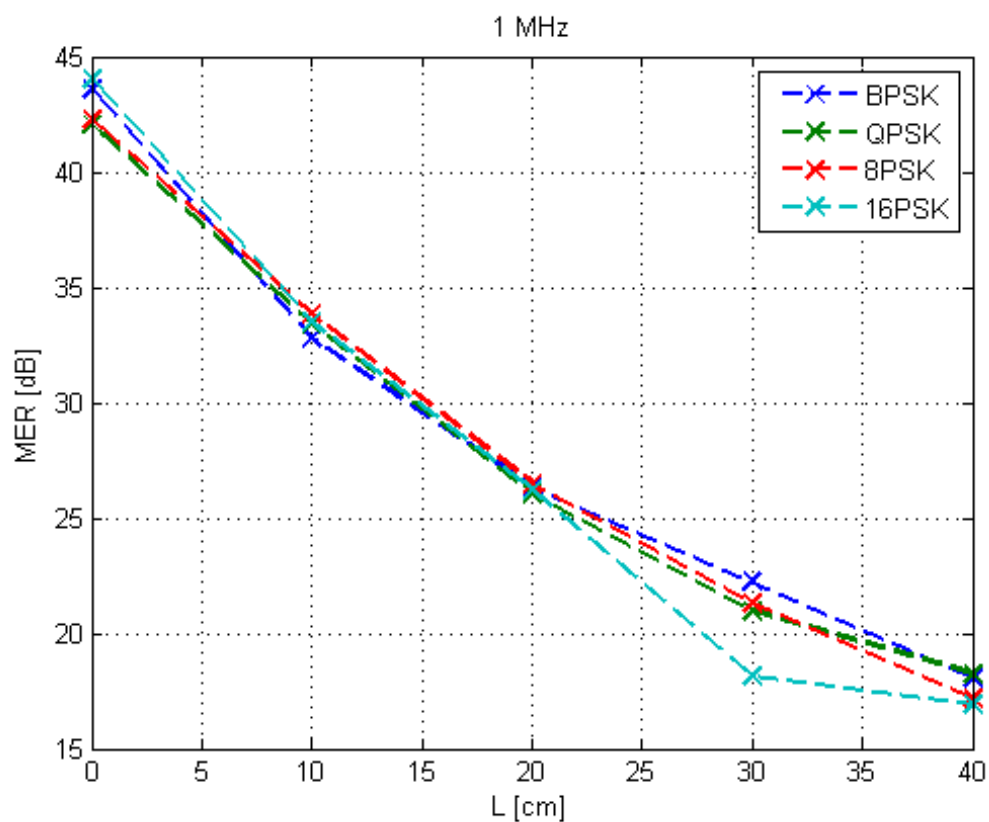


**Obrázek A.3:** Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 10 MHz na kompletním optickém vysílači

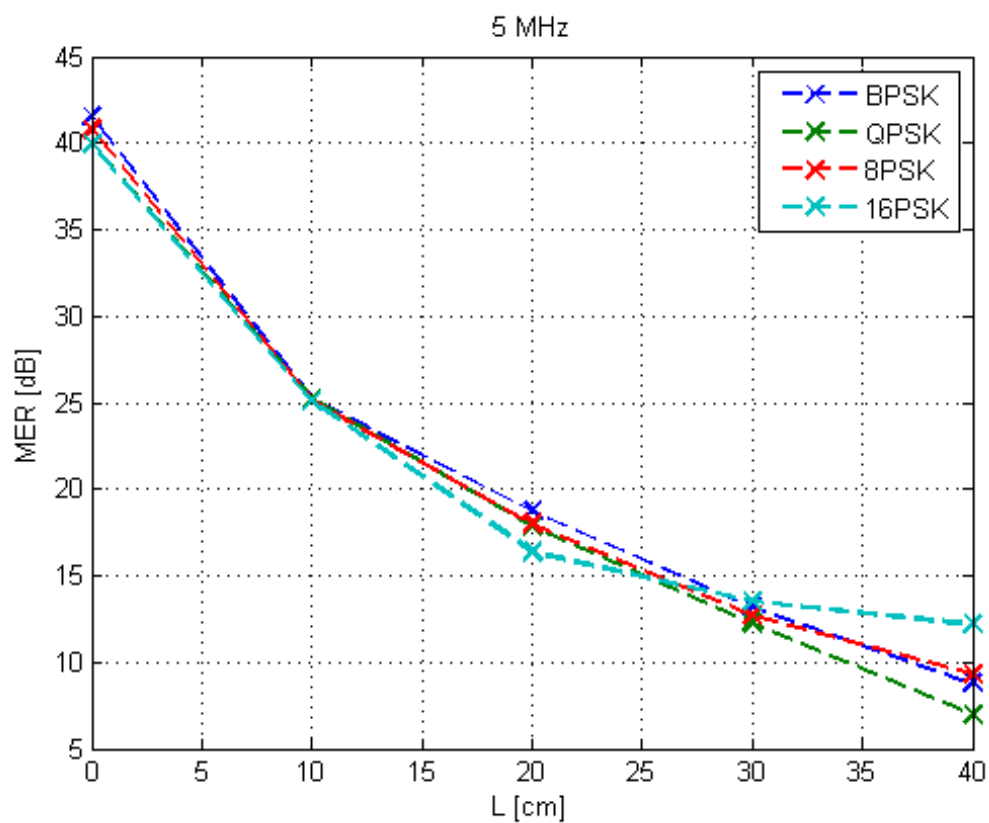


**Obrázek A.4:** Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 15 MHz na kompletním optickém vysílači

## A GRAFY A MĚŘENÍ



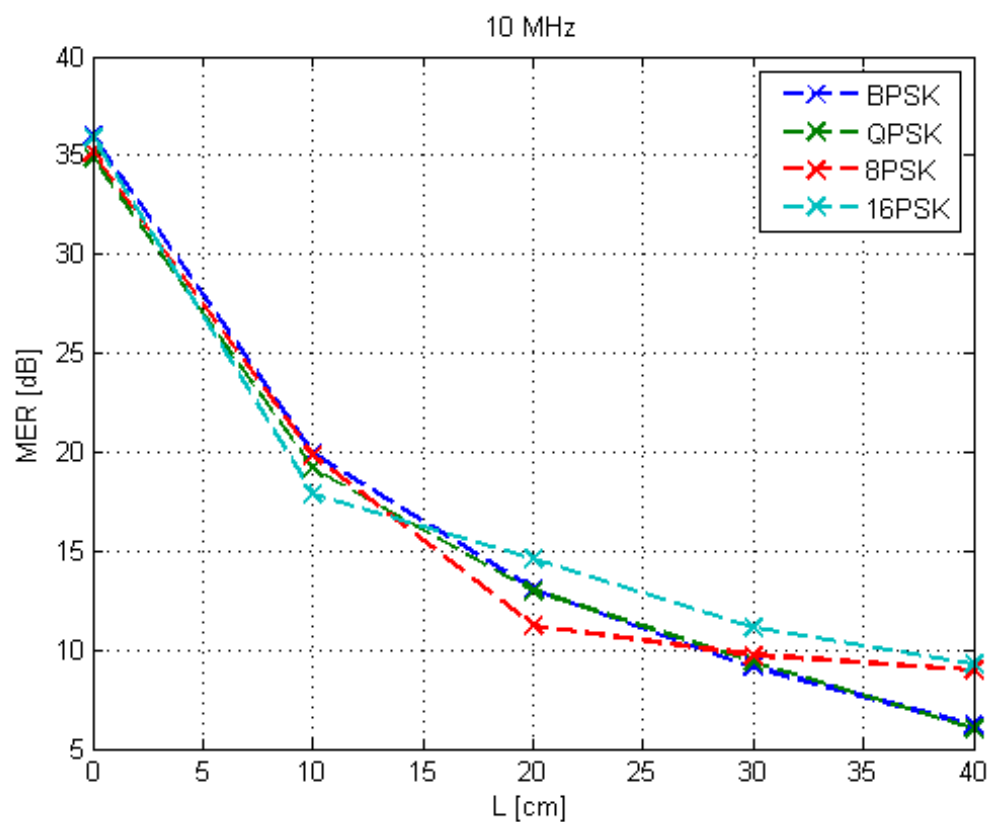
Obrázek A.5: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na kompletním optickém vysílači



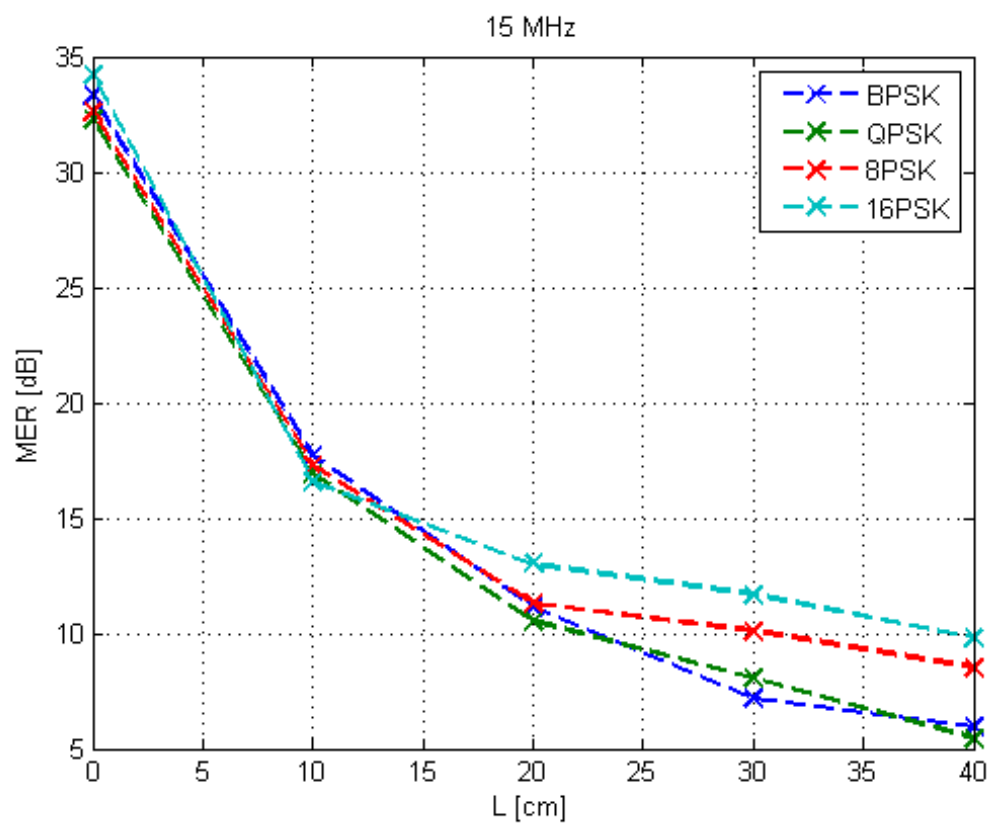
Obrázek A.6: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na kompletním optickém vysílači



## A GRAFY A MĚŘENÍ



Obrázek A.7: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 10 MHz na kompletním optickém vysílači



Obrázek A.8: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 15 MHz na kompletním optickém vysílači

**Tabulka A.2:** Naměřené hodnoty MER a EVM pro PSK modulace na kompletním optickém vysílači

Modulace	Nosná vlna [MHz]	Vzdálenost [cm]							
		0		10		20		30	
		EVM [%]	MER [dB]	EVM [%]	MER [dB]	EVM [%]	MER [dB]	EVM [%]	MER [dB]
BPSK	1	0,66	43,61	2,30	32,77	4,82	26,34	7,74	22,23
	5	0,84	41,54	5,50	25,19	17,57	18,74	21,96	13,17
	10	1,59	35,97	10,09	19,92	22,16	13,09	34,94	9,13
	15	2,17	33,29	13,06	17,68	27,84	11,11	43,73	7,18
QPSK	1	0,79	42,06	2,13	33,42	4,98	26,06	8,93	20,98
	5	1,00	39,98	5,50	25,19	12,82	17,84	24,29	12,29
	10	1,86	34,91	11,00	19,17	22,39	13,00	33,89	9,40
	15	2,43	32,3	14,22	16,94	29,72	10,54	39,64	8,04
8PSK	1	0,77	42,27	2,03	33,83	4,72	26,51	8,06	21,31
	5	0,91	40,83	5,55	25,12	12,56	18,02	23,20	12,69
	10	1,75	35,13	10,22	19,81	27,53	11,20	32,64	9,73
	15	2,35	32,59	13,67	17,29	27,23	11,30	31,29	10,10
16PSK	1	0,63	44,05	2,11	33,52	4,89	26,22	12,42	18,12
	5	1,01	39,95	5,59	25,05	15,17	16,38	21,13	13,50
	10	1,61	35,87	12,78	17,87	18,63	14,60	27,75	11,14
	15	1,95	34,24	14,82	16,58	22,34	13,02	26,07	11,68

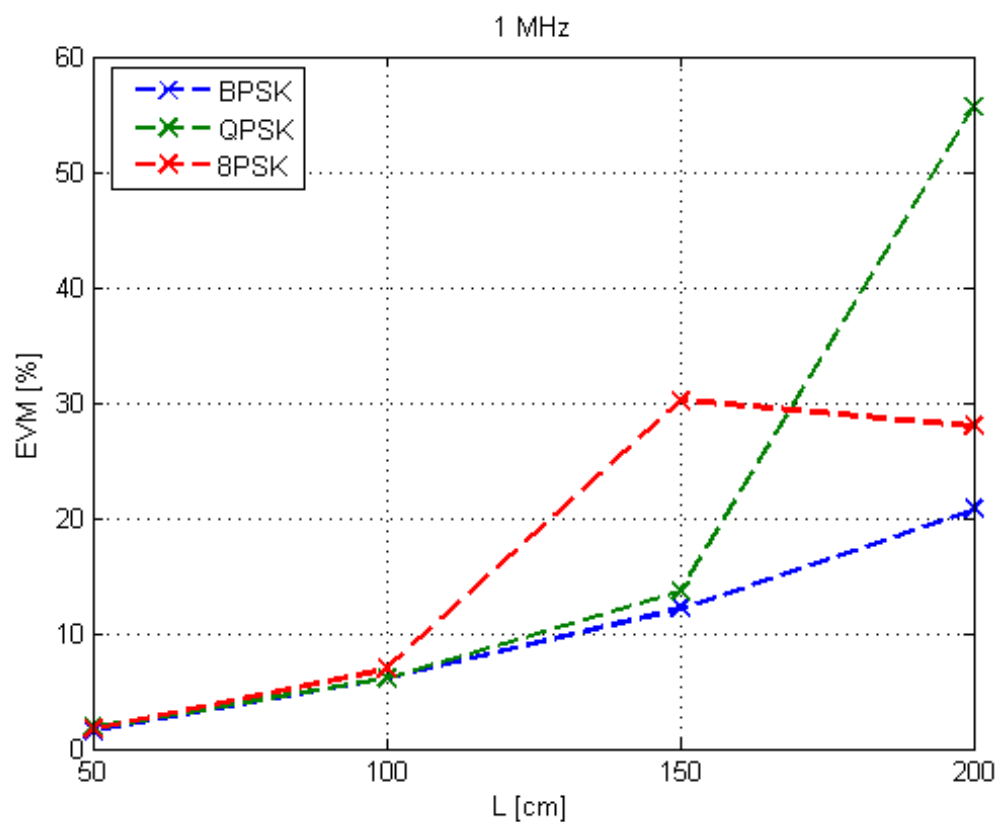
## A GRAFY A MĚŘENÍ

---

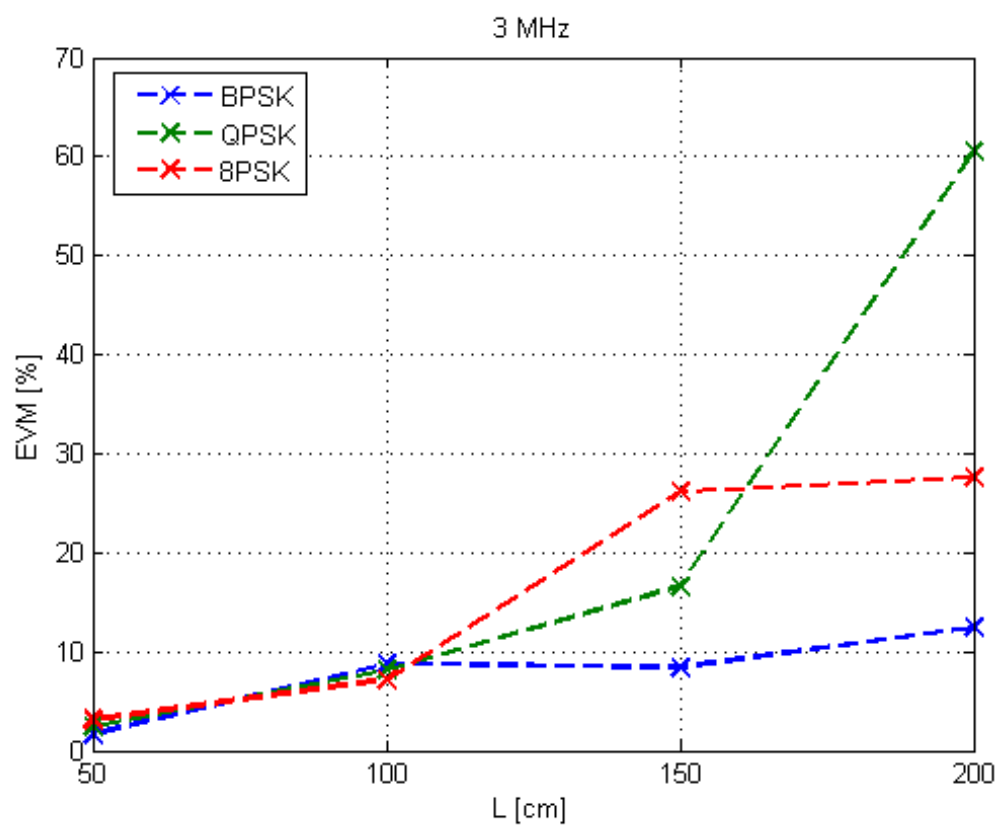
**Tabulka A.3:** Rychlosti modulací PSK na komunikační LED diodě

Modulace	Nosná vlna [MHz]	Vzdálenost [cm]				Vzdálenost [cm]			
		50	100	150	200	50	100	150	200
		Symbolová rychlost [kHz]				Přenosová rychlost [kbit/s]			
BPSK	1	1100	800	400	200	1100	800	400	200
	3	2600	2500	200	100	2600	2500	200	100
	5	5200	1000	300	80	5200	1000	300	80
	7	5000	400	200	20	5000	400	200	20
QPSK	1	1000	1000	200	100	2000	2000	400	200
	3	2000	800	200	90	4000	1600	400	180
	5	3000	700	150	50	6000	1400	300	100
	7	2000	200	100	0	4000	400	200	0
8PSK	1	1000	500	100	0	3000	1500	300	0
	3	1800	200	50	0	5400	600	150	0
	5	1000	150	20	0	3000	450	60	0
	7	1000	80	0	0	3000	240	0	0

## A GRAFY A MĚŘENÍ

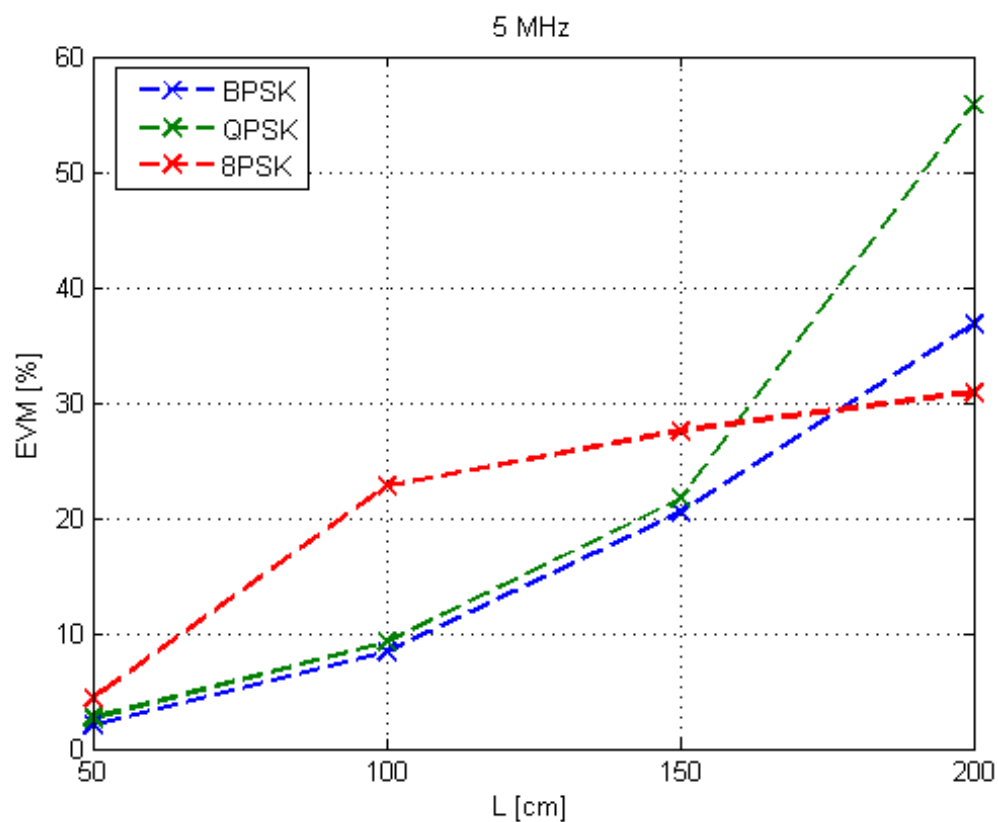


Obrázek A.9: Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na komunikační LED diodě

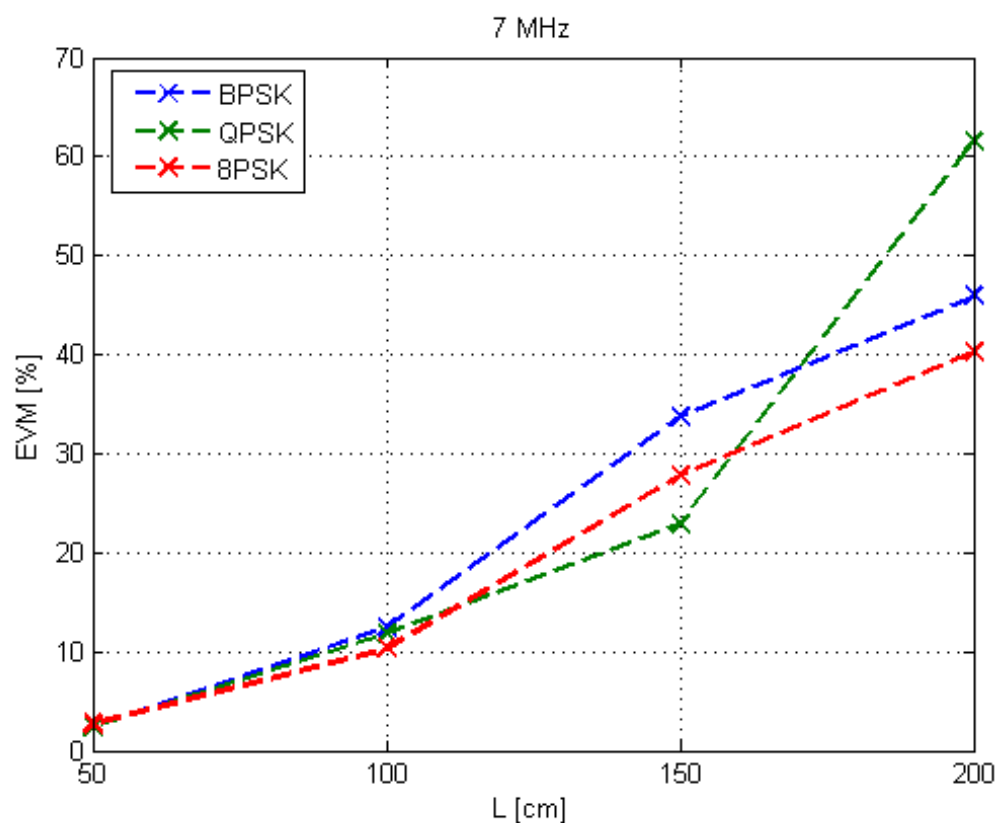


Obrázek A.10: Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 3 MHz na komunikační LED diodě

## A GRAFY A MĚŘENÍ

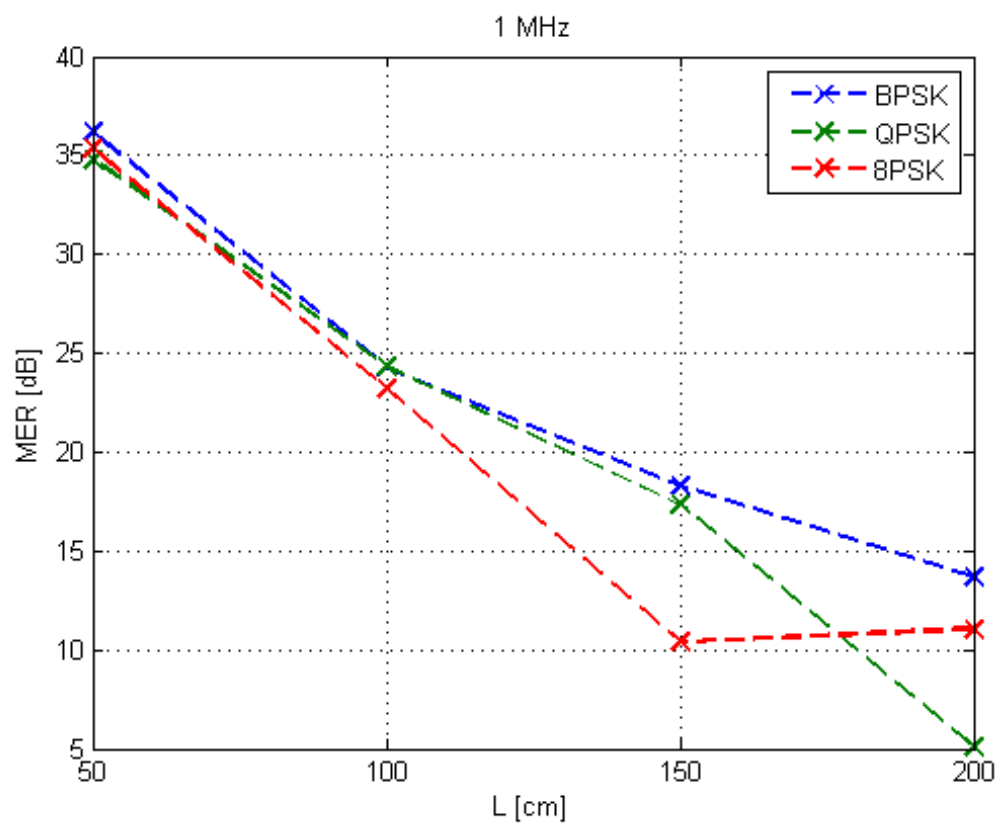


Obrázek A.11: Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na komunikační LED diodě

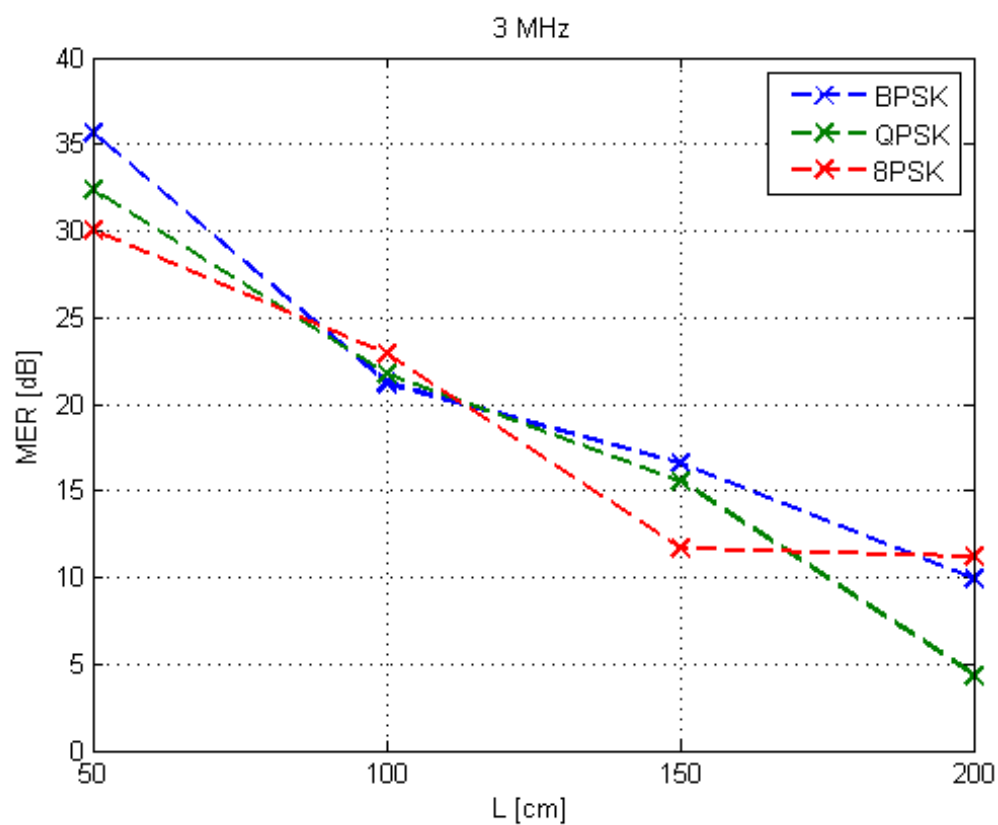


Obrázek A.12: Změna EVM v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 7 MHz na komunikační LED diodě

## A GRAFY A MĚŘENÍ

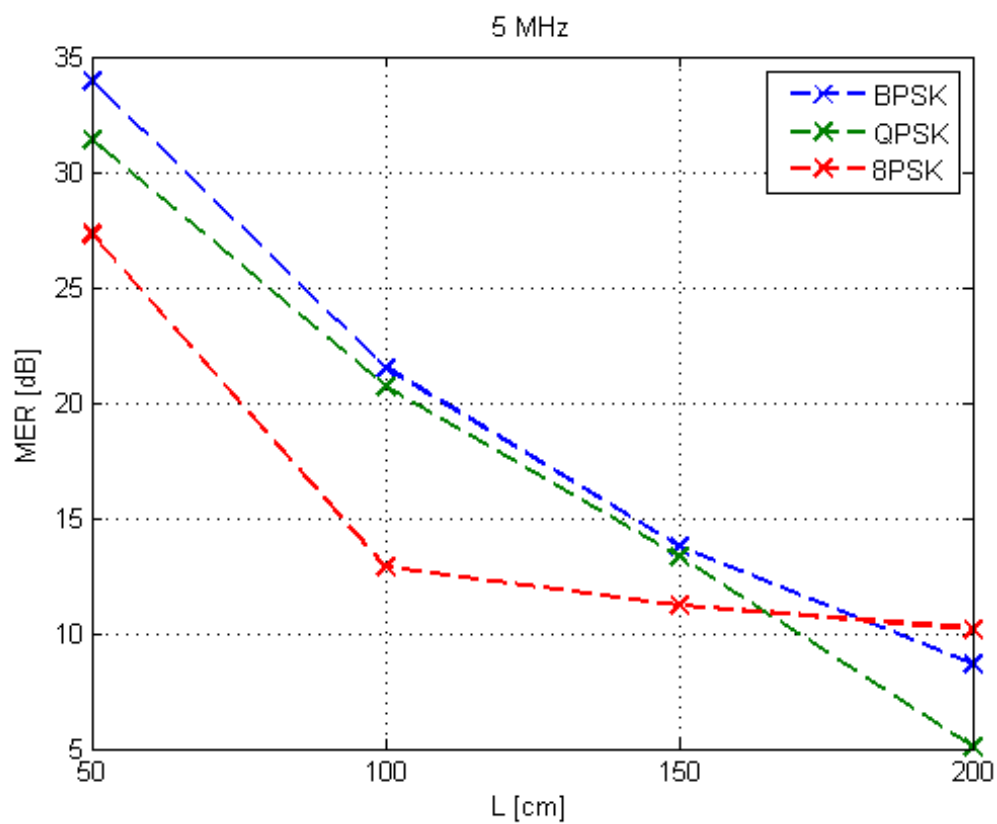


Obrázek A.13: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 1 MHz na komunikační LED diodě

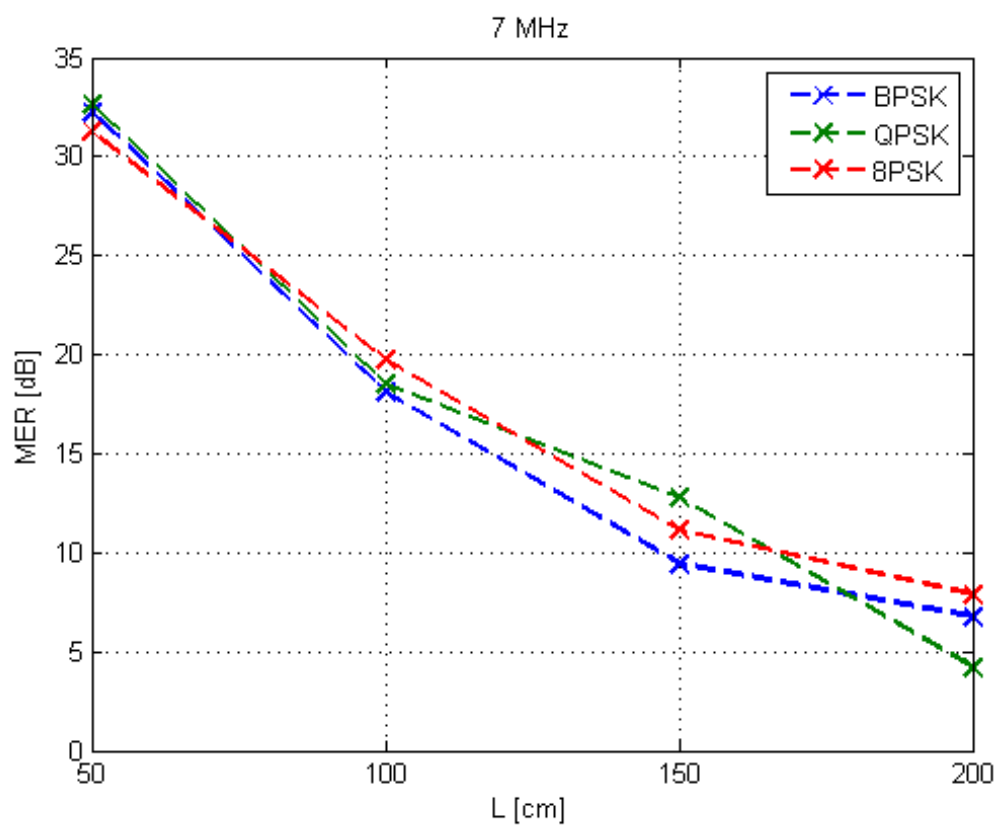


Obrázek A.14: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 3 MHz na komunikační LED diodě

## A GRAFY A MĚŘENÍ



Obrázek A.15: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 5 MHz na komunikační LED diodě



Obrázek A.16: Změna MER v závislosti na vzdálenosti pro nosnou vlnu 7 MHz na komunikační LED diodě

Tabulka A.4: Naměřené hodnoty MER a EVM pro PSK modulace na komunikační LED diodě

Modulace	Nosná vlna [MHz]	Vzdálenost [cm]							
		50		100		150		200	
		EVM [%]	MER [dB]	EVM [%]	MER [dB]	EVM [%]	MER [dB]	EVM [%]	MER [dB]
BPSK	1	1,55	36,19	6,11	24,28	12,17	18,30	20,78	13,65
	3	1,65	35,65	8,70	21,21	14,81	16,59	31,79	9,95
	5	2,00	33,97	8,41	21,51	20,49	13,77	36,86	8,67
	7	2,43	32,27	12,44	18,10	33,73	9,44	45,93	6,76
QPSK	1	1,82	34,81	6,08	24,32	13,60	17,33	55,62	5,10
	3	2,40	32,39	8,17	21,75	16,62	15,58	60,53	4,36
	5	2,69	31,41	9,24	20,69	21,66	13,29	55,84	5,06
	7	2,33	32,67	11,84	18,53	22,94	12,79	61,53	4,22
8PSK	1	1,71	35,33	6,91	23,20	30,18	10,40	27,98	11,06
	3	3,14	30,05	7,19	22,87	26,13	11,66	27,56	11,19
	5	4,31	27,31	22,72	12,87	27,56	11,19	30,89	10,02
	7	2,73	21,25	10,31	19,74	27,75	11,13	40,29	7,90